

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS DE PRECISÃO COM
ÊNFASE NO USO DE SISTEMAS DE AJUSTAGEM**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

CLÁUDIO JOSÉ WEBER

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2001

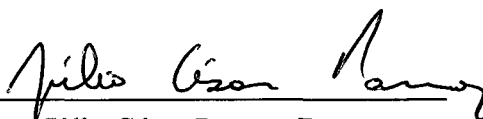
METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS DE PRECISÃO COM
ÊNFASE NO USO DE SISTEMAS DE AJUSTAGEM

CLÁUDIO JOSÉ WEBER

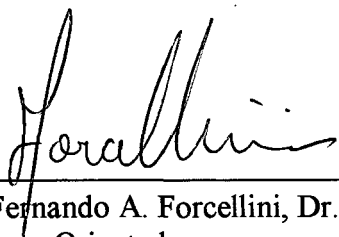
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

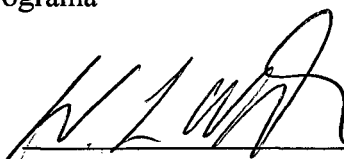
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO PROJETO
DE SISTEMAS MECÂNICOS, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.



Júlio César Passos, Dr
Coordenador do Programa



Prof. Fernando A. Forcellini, Dr. Eng.
Orientador

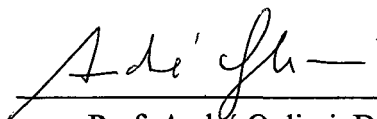


Prof. Walter L. Weingaertner, Dr.-Ing.
Co-orientador

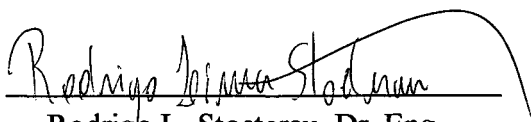
BANCA EXAMINADORA



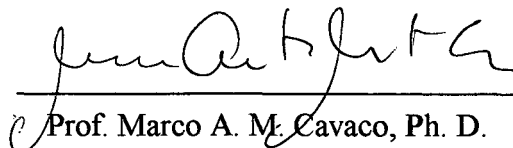
Prof. Nelson Back, Ph. D.



Prof. André Ogliari, Dr. Eng.



Rodrigo L. Stoeterau, Dr. Eng.



Prof. Marco A. M. Cavaco, Ph. D.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Verónica, pelo incentivo e inúmeras sugestões;

Ao Professor Fernando A. Forcellini, pela amizade, orientação e pelas contribuições no trabalho;

Ao Professor Walter L. Weingaertner, pelas contribuições;

Ao Professor Günter Höhne e sua equipe da Universidade Técnica de Ilmenau na Alemanha pela bibliografia e hospitalidade;

Ao bolsista Felipe Gallina, pelas traduções e auxílio nos estudos de caso;

Ao Ângelo V. dos Reis, pelas contribuições no estudo de caso;

Ao Rodrigo L. Stoeterau, pelas contribuições e sugestões no trabalho;

A todos os colegas do NeDIP, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho;

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade concedida;

Ao CNPq, pela bolsa oferecida e o incentivo a pesquisa;

A todos que direta e indiretamente contribuíram no desenvolvimento deste trabalho, e que tornaram-se merecedores de agradecimento.

A simplicidade é a essência da sofisticação.

Cláudio J. Weber, 1998

SUMÁRIO

SÚMARIO	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
GLOSSÁRIO	xii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
 CAPÍTULO 1	 1
INTRODUÇÃO	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Objetivos específicos	3
1.4. Justificativa	3
1.5. Estrutura do trabalho	4
1.6. Contribuições	5
 CAPÍTULO 2	 7
ESTADO DA ARTE DAS TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE PRECISÃO FUNCIONAL	7
2.1. Erros em produtos	8
2.1.1. Obtenção das variáveis de influência	11
2.1.2. Insensibilidade e invariância	12
2.1.3. Minimização dos fatores de erros	13
2.1.4. Fatores de erros que influenciam a precisão dos produtos	14
2.1.5. Erros em um corpo rígido	15
2.1.6. Comportamento de erro no desenvolvimento de produtos	16
2.1.7. Erros nas fases de projeto de um produto	16
2.2. Técnicas para obtenção de precisão funcional	19
2.2.1. Princípio de arranjos com poucos erros	20
2.2.2. Melhoria do comportamento de erro	21
2.2.3. Compensação de erros	23
2.2.4. Compensação de erros geométricos em máquinas-ferramenta	25
2.2.5. Compensação de erros termicamente induzidos durante o processo de usinagem	27
2.2.6. Técnicas de controle	29
2.2.7. Substituição de movimentos em máquinas	32
2.2.8. Ajustagem	32
2.2.9. Cadeias de medidas e cadeias de tolerâncias	36
2.2.10. Método máximo – mínimo	38
2.2.11. Método teórico de probabilidade	38
2.2.12. Método da ajustagem e compensação	38
2.2.13. Método da intercambiabilidade de grupos	38
2.2.14. Análise de cadeias de tolerâncias e de medidas auxiliada por computador	39
2.3. Conclusões do capítulo	40
 CAPÍTULO 3	 42
AJUSTAGEM	42
3.1. Definição de ajustagem	42

3.2.	Classificação dos sistemas de ajustagem	44
3.3.	Configuração básica de um sistema de ajustagem	45
3.4.	Tipos de movimento em produtos	46
3.4.1.	Tipos de movimentos de ajustagem	47
3.5.	Faixa de ajuste e sensibilidade	48
3.6.	Circuitos de ajustagem	50
3.7.	Tipos de ação de ajuste	56
3.8.	Recomendações para a ajustagem	56
3.9.	Preparação das informações para a ajustagem	59
3.10.	Plano de ajustagem	64
3.11.	Procedimentos necessários para realização da ajustagem	66
3.12.	Sistemas computacionais de apoio a ajustagem	67
3.12.1.	Ferramenta computacional para auxílio na seleção de sistemas de ajustagem	67
3.12.2.	Programa para simulação do processo de ajustagem (ILJUR)	69
3.12.3.	Sistemas paramétricos	74
3.12.4.	Planilhas de cálculo	75
3.12.5.	Bancada de ajustagem	80
3.12.6.	Sistemas automatizados de ajustagem	80
3.13.	Conclusões do capítulo	82
CAPÍTULO 4	.....	83
METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS DE PRECISÃO COM ÊNFASE NO USO DE SISTEMAS DE AJUSTAGEM	.....	83
4.1.	Descrição da metodologia	85
4.1.1.	Fase de projeto informacional	87
4.1.2.	Fase de projeto conceitual	91
4.1.3.	Fase de projeto preliminar	98
4.1.4.	Fase de projeto detalhado	100
4.2.	Conclusões do capítulo	101
CAPÍTULO 5	.....	103
APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO REPROJETO DA CADEIA CINEMÁTICA DE ACIONAMENTO DE UM DISCO DOSADOR DE UMA SEMEADORA DE PRECISÃO	.....	103
5.1.	Projeto informacional	106
5.1.1.	Identificar e registrar necessidades do cliente e/ou mercado	106
5.1.2.	Estabelecer os requisitos de projeto do produto	106
5.1.3.	Estabelecer as especificações de projeto	107
5.1.4.	Identificar as fontes de erros e direções sensíveis	107
5.1.5.	Modelar e simular os princípios de solução	108
5.2.	Conclusões do capítulo	122
CAPÍTULO 6	.....	125
APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO DESENVOLVIMENTO DE CONFIGURAÇÕES MODULARES EM UM TORNO DE ULTRAPRECISÃO	.....	125
6.1.	Projeto informacional	129
6.1.1.	Identificar e registrar as necessidades do cliente e/ou mercado	129
6.1.2.	Estabelecer os requisitos de projeto do produto	129
6.1.3.	Analisar produtos concorrentes	131

6.1.4.	Estabelecer as especificações de projeto	131
6.1.5.	Identificar as fontes de erros e direções sensíveis	132
6.2.	Projeto conceitual	134
6.2.1.	Projetar circuito de ajustagem	134
6.2.2.	Definir os movimentos, locais e base de ajustagem	135
6.2.3.	Estabelecer princípios de solução da unidade de ajustagem	136
6.2.4.	Definição dos meios auxiliares a serem empregados na ajustagem	137
6.3.	Projeto preliminar	138
6.4.	Projeto detalhado	141
6.5.	Conclusões do capítulo	145
CAPÍTULO 7	.....	147
CONSIDERAÇÕES FINAIS	.....	147
7.1.	Conclusões	147
7.2.	Dificuldades encontradas	148
7.3.	Contribuições	148
7.4.	Sugestões para trabalhos futuros	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	151
BIBLIOGRAFIA	.....	156
Anexo 1	.....	159
Anexo 2	.....	160
Anexo 3	.....	161
Anexo 4	.....	162

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1.	Erros individuais e variáveis de influência em produtos.....	9
FIGURA 2.2.	Fatores de erros que influenciam a precisão dos produtos.....	14
FIGURA 2.3.	Graus de liberdade de um corpo rígido.....	15
FIGURA 2.4.	Erros que podem estar presentes ao longo do processo de projeto.....	18
FIGURA 2.5.	Mecanismo com barra e excêntrico.....	20
FIGURA 2.6.	Diagrama de blocos de um CNC adicionado de um sistema de compensação de erros em tempo real.....	26
FIGURA 2.7.	Controle de compensação de erro em tempo real.....	29
FIGURA 2.8.	Diagrama de blocos de um sistema de controle de malha fechada.....	30
FIGURA 2.9.	Diagrama do sistema de controle de retinidade FCC.....	31
FIGURA 2.10.	Relação entre os custos e tolerâncias.....	36
FIGURA 3.1.	Posições possíveis dos refletores para a reflexão paralela de um feixe de luz.....	43
FIGURA 3.2.	Componentes de um sistema de ajustagem.....	45
FIGURA 3.3.	Tipos de movimento: a) fixo, b) posicionável, c) ajustável, d) móvel.....	47
FIGURA 3.4.	Tipos de movimentos usadas na ajustagem.....	47
FIGURA 3.5.	Símbolos básicos para indicar as direções de movimento.....	48
FIGURA 3.6.	Exemplo de sensibilidade e faixa de ajuste.....	49
FIGURA 3.7.	Circuito de ajustagem.....	50
FIGURA 3.8.	Circuito de ajustagem aberto.....	51
FIGURA 3.9.	Circuito de ajustagem fechado.....	51
FIGURA 3.10.	Circuito de ajustagem simples.....	52
FIGURA 3.11.	Circuito de ajustagem acoplado.....	53
FIGURA 3.12.	Circuitos de ajustagem acoplados e circuito simples adicional.....	53
FIGURA 3.13.	Esquema das possíveis situações de ajustagem e seus circuitos.....	54
FIGURA 3.14.	Seqüência de ajustagem para espelhos.....	58
FIGURA 3.15.	Diagrama de requisitos de um instrumento de medição.....	60
FIGURA 3.16.	Dimensões funcionalmente significativas de uma barra de seno.....	62
FIGURA 3.17.	Diagrama de tolerâncias de um instrumento de medição.....	63
FIGURA 3.18.	Desenho do dispositivo para o plano de ajustagem.....	64
FIGURA 3.19.	Fluxograma dos procedimentos necessários para a realização da ajustagem.....	66
FIGURA 3.20.	Mecanismo de 4 barras.....	70
FIGURA 3.21.	Circuito de ajustagem acoplado do mecanismo de 4 barras.....	71
FIGURA 3.22.	Tela de entrada de dados do programa ILJUR.....	72
FIGURA 3.23.	Tela de simulação do programa ILJUR.....	73
FIGURA 3.24.	Modelagem de mecanismo de 4 barras.....	75
FIGURA 3.25.	Valores de erro residual para cada ângulo de acionamento do mecanismo de quatro barras.....	78
FIGURA 3.26.	Valores de influência ϵ das barras.....	78
FIGURA 3.27.	Esquema para automatizar o processo de ajustagem.....	81
FIGURA 4.1.	Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem.....	86
FIGURA 4.2.	Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da fase 1: projeto informacional.....	90
FIGURA 4.3.	Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da continuação da fase 1: projeto informacional.....	91

FIGURA 4.4.	Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da fase 2: projeto conceitual.....	95
FIGURA 4.5.	Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da continuação da fase 2: projeto conceitual.....	96
FIGURA 4.6.	Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da continuação da fase 2: projeto conceitual.....	97
FIGURA 4.7.	Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da fase 3: projeto preliminar.....	99
FIGURA 4.8.	Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da continuação da fase 2: projeto conceitual.....	100
FIGURA 5.1.	a) mecanismo dosador; b) modelo de disco dosador com uma carreira de alvéolos.....	104
FIGURA 5.2.	Desenho esquemático típico da cadeia cinemática de acionamento do disco dosador de uma semeadora de precisão.....	105
FIGURA 5.3.	Gráfico de comparação entre os métodos 1 e 2 para a parcela de erro de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido ao erro de espaçamento entre dois alvéolos $\Delta \alpha$	115
FIGURA 5.4.	Gráfico de comparação entre os métodos 1 e 2 para os erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido ao erro na relação de transmissão ΔR_T	115
FIGURA 5.5.	Gráfico de comparação entre os métodos 1 e 2 para a parcela de erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a variação de escorregamento Δef	116
FIGURA 5.6.	Gráfico da simulação dos erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes valores de velocidade da semeadora v e para diferentes valores erros de relação de transmissão ΔR_T	117
FIGURA 5.7.	Gráfico da simulação dos erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes valores de raio da roda r e diferentes valores de erros de relação de transmissão ΔR_T	118
FIGURA 5.8.	Gráfico da simulação dos erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes quantidades de alvéolos na no disco dosador e de diferentes valores de erros de relação de transmissão ΔR_T	119
FIGURA 5.9.	Gráfico da simulação da parcela de erro de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido ao erro de espaçamento entre dois alvéolos $\Delta \alpha$, e a diferentes quantidades de alvéolos na do disco dosador.....	119
FIGURA 5.10.	Gráfico da simulação da parcela de erro de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes erros de relação de transmissão ΔR_T , e para diferentes valores de relação de transmissão R_T	120
FIGURA 5.11.	Gráfico da simulação da parcela de erro de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a variação de escorregamento Δef , e para diferentes valores de relação de transmissão R_T	121
FIGURA 5.12.	Gráfico da simulação dos erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes valores de escorregamento Δef , e para diferentes valores de erros de relação de transmissão ΔR_T	122
FIGURA 6.1.	Configuração na forma de um Torno $R\theta$	126

FIGURA 6.2.	Configuração na forma de um Torno ZX	128
FIGURA 6.3.	Requisitos de precisão do torno de ultra precisão para ambas as configurações.....	130
FIGURA 6.4.	Circuito de ajustagem para a configuração ZX do torno.....	135
FIGURA 6.5.	Matriz de concepção da unidade de ajustagem.....	136
FIGURA 6.6.	Matriz de Pugh para avaliação das concepções.....	137
FIGURA 6.7.	Solução 2, dispositivo de ajuste da arfagem (12).	137
FIGURA 6.8.	Arranjo do dispositivo de ajuste da arfagem (12).....	139
FIGURA 6.9.	Detalhe da vista superior do torno para o plano de ajustagem do erro de guinamento do cabeçote (6).	142
FIGURA 6.10.	Detalhe da vista lateral do torno para o plano de ajustagem do erro de arfagem do cabeçote (6).	143
FIGURA 6.11.	Detalhe da vista lateral do torno para o plano de ajustagem do desalinhamento da ponta da ferramenta (8) com o eixo W do cabeçote (6).	144

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1.	Erros que podem estar presentes ao longo de todas as fases de projeto.....	19
TABELA 2.2.	Relação entre os princípios de projeto e os elementos que constituem a estrutura.....	21
TABELA 2.3.	Melhoria do comportamento de erro nas fases do desenvolvimento do produto.	22
TABELA 2.4.	Medidas para melhoria do comportamento de erro.	23
TABELA 2.5.	Principais aspectos que envolvem a ajustagem.....	34
TABELA 2.6.	Comparativo entre as várias técnicas e ferramentas para a redução de erros.....	41
TABELA 3.1.	Quadro das situações de ajustagem, e suas características.....	55
TABELA 3.2.	Sumário de erros do instrumento de medição.....	61
TABELA 3.3.	Sumário das dimensões funcionalmente significativas do mecanismo da figura 3.16.....	62
TABELA 3.4.	Legenda do dispositivo da figura 3.18 para o plano de ajustagem	64
TABELA 3.5.	Exemplo de um plano de ajustagem do dispositivo da figura 3.18.	65
TABELA 3.6.	Tabela das características qualitativas das exigências e das características disponíveis na solução.....	68
TABELA 3.7.	Ampliação da tabela 3.6.	69
TABELA 3.8.	Dados de entrada para o programa ILJUR.	72
TABELA 3.9.	Comparativo entre o método desenvolvido e o programa ILJUR.	79
TABELA 6.1.	Formas geométricas a serem usinadas e seus requisitos de precisão	129
TABELA 6.2.	Especificações de projeto.....	132
TABELA 6.3.	Custos preliminares dos materiais e componentes do dispositivo de ajuste da arfagem (12).....	141
TABELA 6.4.	Custos preliminares da mão de obra de fabricação das peças e da montagem do dispositivo de ajuste da arfagem (12).....	141
TABELA 6.5.	Plano de ajustagem do erro de guinamento do cabeçote (6).	142
TABELA 6.6.	Plano de ajustagem do erro de arfagem do cabeçote (6).....	143
TABELA 6.7.	Plano de ajustagem do desalinhamento da ponta da ferramenta (8) com o cabeçote (6).	144
TABELA 6.8.	Detalhamento dos custos de desenvolvimento do dispositivo de ajuste da arfagem (12), e o custo da ajustagem.....	145

GLOSSÁRIO

Aceitáveis: segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-004 (1994), é o termo que caracteriza a ocorrência de distâncias usadas como referência (X_{ref}) entre sementes na semeadura, sendo que as distâncias devem estar dentro dos limites de 0,5 e $1,5X_{ref}$, porém alguns pesquisadores trabalham com distâncias entre sementes de 0,7 e $1,2X_{ref}$.

Ajustador: pessoa ou máquina que realiza a ajustagem.

Ajustagem: é definida por HANSEN, 1970, como sendo o reposicionamento de componentes funcionais durante ou depois da montagem em uma direção sensível à precisão funcional, para que após o reposicionamento, isto é, o ajuste dos componentes funcionais, as funções do sistema técnico possam ser realizadas com a precisão requerida.

Base de ajustagem: é o componente do produto a partir do qual a ajustagem é conduzida na prática, ou seja, a base de ajustagem é usada como sistema de referência para o processo de ajustagem. Ela deve existir fisicamente e estar adequadamente definida.

Circuito de ajustagem: é a representação esquemática dos problemas de ajustagem, e podem se configurar de diversas formas como: aberto ou fechado, simples ou acoplado em série, paralelo.

Componentes: são todos os elementos que são adquiridos na forma pronta para serem incorporados ao produto para que possam cumprir uma determinada função.

Controle realimentado: refere-se a uma operação que na presença de perturbações ou distúrbios, tende a reduzir a diferença entre a saída de um sistema e alguma entrada de referência e opera com base nesta diferença.

Crítérios de ajustagem: são as variáveis utilizadas para a realização e análise dos resultados de ajustagem.

Densidade de semeadura: segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-010 (1996), é o número de sementes distribuídas por unidade de comprimento, expressa em número de sementes por metro linear (sementes.m⁻¹).

Desvio: para Krause (2000), entende-se por desvio a não manutenção de grandezas ou valores preestabelecidos, e que diferencia-se entre desvios permissíveis (manutenção de uma tolerância preestabelecida) e desvios não permissíveis (ultrapassagem da tolerância preestabelecida).

Comumente os desvios permissíveis e os não permissíveis são também utilizados como sinônimos, pois podem ocorrer para cada modo de análise, tanto de erros como de desvios.

Dispositivo permanente de ajustagem: são todos os componentes que participam de uma ajustagem em uma unidade de ajuste, e que após a ajustagem permanecem nesta unidade de ajustagem.

Dispositivo provisório de ajustagem: são todos os componentes que participam de uma ajustagem em uma unidade de ajuste, e que após a ajustagem são retirados desta unidade de ajustagem.

Distância entre sementes: segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-004 (1994), é a distância entre sementes, ou grupo de sementes, numa mesma linha de semeadura, medida a partir do centro geométrico de sementes consecutivas, no caso de semeadura individualizada e, do centro geométrico de grupos consecutivos, no caso de semeadura agrupada.

Distância referência (X_{ref}): segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-004 (1994), é a distância entre sementes, ou grupo de sementes, definida a partir da recomendação agrônômica de densidade de semeadura, expressa em mm.

Equação matricial do sistema de ajustagem: sistema de equações que descreve com o auxílio da matriz de influência a relação entre as variáveis de influência e de saída, com o qual o comportamento de ajustagem de um produto pode ser matematicamente modelado.

Erro: é a quantidade pela qual um valor assumido se desvia do valor verdadeiro, segundo Slocum (1992). De encontro a esta definição Krause (2000) propõe que erro é um valor característico que não preenche as exigências preestabelecidas. O erro é composto por três parcelas, os erros sistemáticos, aleatórios e os grosseiros.

Erros aleatórios: são aqueles que, relacionados à precisão do resultado, podem ser tratados estatisticamente Slocum (1992), e surgem em função de fatores aleatórios. Em metrologia quando uma medição é repetida diversas vezes, nas mesmas condições, observam-se variações nos valores obtidos. Em relação ao valor médio, nota-se que estas variações ocorrem de forma imprevisível, tanto para valores acima do valor médio, quanto para abaixo. Este efeito é provocado pelo erro aleatório.

Erros grosseiros: geralmente, decorrente de mau uso ou mau funcionamento do sistema de medição. Pode, por exemplo, ocorrer em função de leitura errônea, operação indevida ou dano

do sistema de medição. Seu valor é totalmente imprevisível, porém geralmente sua existência é facilmente detectável.

Erros sistemáticos: são aqueles que ocorrem da mesma forma a cada medição e podem ser descobertos pelo exame dos resultados, Slocum (1992). Os erros sistemáticos estão sempre presentes em verificações realizadas sob idênticas condições de operação. Um dispositivo mostrador com seu ponteiro "torto" é um exemplo clássico de erro sistemático, que sempre se repetirá enquanto o ponteiro estiver torto.

Estágios: segundo Maribondo (2000), podem ser entendidos como sendo qualquer uma das partes em que pode ser dividido ou subdividido o processo de projeto.

Etapas: segundo Maribondo (2000), correspondem a cada um dos estágios em que se pode dividir o desenvolvimento de uma fase. Dentro do processo de projeto, elas correspondem ao segundo nível de desdobramento e possuem um nível de abstração menor quando comparadas com as fases.

Falhas: segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-004 (1994), é o termo que caracteriza a ocorrência de distâncias entre sementes maiores que $1,5X_{ref}$.

Fases: segundo Maribondo (2000), podem ser compreendidas como um dos estágios mais abrangentes do processo de projeto. Dentro do processo de projeto, correspondem ao primeiro nível de desdobramento. Possuem um alto grau de abstração para o desenvolvimento do problema devido, principalmente, a abrangência de seus objetivos.

Ferramenta: é a instrumentalização do conhecimento e/ou das técnicas necessárias ao desenvolvimento de uma atividade.

Habilidade funcional de um produto: é definida como a possibilidade de se incorporar novas funções ao produto.

Incerteza: significa "dúvida", de forma ampla "incerteza da medição" significa "dúvida acerca do resultado de uma medição". Formalmente, define-se incerteza como: "parâmetro, associado com o resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao o valor momentâneo de uma grandeza física.

Intercambiabilidade completa: é dada quando todos os componentes de um produto representado pela cadeia de medidas e de tolerâncias podem ser montados de modo que, sem ultrapassar a tolerância final exigida, a função esteja garantida em cada caso.

Intercambiabilidade incompleta: só é possível obter-se com uma quantia planejada de ultrapassagens da tolerância final pré-estipulada, onde a distribuição estatística e a probabilidade de diferentes combinações de valores devem ser consideradas. A intercambiabilidade incompleta na montagem existe quando elimina-se através de ajustagem ou compensação a ultrapassagem inicialmente disponível da tolerância final.

Matriz de influência: representação matemática dos valores de um sistema de equações, especificamente dos valores de influência.

Mecanismo dosador: segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-010 (1996), transfere o material, semente ou fertilizante, do reservatório para o componente de deposição, segundo densidade de semeadura ou razão de distribuição, isto é, uma dosagem em ambos os casos, preestabelecida;

Meio de ajustagem: é o conjunto dos meios técnicos ou ferramentas necessários para a realização da ajustagem. Os equipamentos de medição necessários para execução da ajustagem são chamados de meios de ajuste. Existe uma grande quantidade de meios de ajustagem para as mais diferentes situações.

Módulos: segundo Maribondo (2000), é definido como um ou mais componentes ou submontagens que reúnem simultaneamente os seguintes requisitos: habilidade para suportar testes funcionais, ajustabilidade, interface padronizada, máxima permutabilidade e transportabilidade. Um módulo pode ser adquirido pronto e formado somente por componentes, pode ser montado com componentes e peças, ou pode ser formado totalmente por peças.

Múltiplos: segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-004 (1994), é o termo que caracteriza a ocorrência de distâncias entre sementes menores que $0,5X_{ref}$.

Peças: são todos os elementos projetados e fabricados para cumprir uma determinada função para o produto em questão.

Ponto de ajustagem: é o local onde é exercida a influência na unidade de ajustagem, em consequência de uma manipulação, e é inicialmente determinado pelo projetista.

Precisão funcional: é a capacidade que um produto tem de desempenhar suas funções com uma precisão previamente definida

Precisão: a precisão pode ser definida como a manutenção de um campo de tolerância por parte de uma peça ou um sistema. (Krause, 2000). Para Smith e Chetwynd (1994) a precisão é usada

de diferentes maneiras no contexto da engenharia, algumas vezes é definido como sinônimo de repetibilidade, outras como faixa de resolução, ou como a definição de um sistema que produza a menor resolução que pode ser tipicamente obtida. Atualmente em metrologia o termo precisão não é mais usado como termo quantitativo, em seu lugar é usado exatidão. Precisão é utilizada como um termo comparativo, por exemplo, a máquina x é mais precisa que a máquina y . Porém nesta dissertação o termo precisão ainda é usado no sentido quantitativo.

Procedimento de ajustagem: é o conjunto de ações necessárias para a realização de uma ajustagem.

Produto: é considerado como sendo um sistema técnico que é uma combinação de elementos ou partes que formam um todo complexo, ou unitário, que tem, ou serve a algum propósito. As partes operantes do sistema técnico são as grandezas de entrada, saída e os processos realizados.

Repetitividade: segundo Slocum (1992), é o erro que ocorre entre um número de sucessivas tentativas de mover um determinado sistema para a mesma posição. Segundo a metrologia a repetitividade especifica a faixa de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatística definida, se situará o valor do erro aleatório da indicação de um sistema de medição, para as condições em que a medição é efetuada.

Resolução: é o maior erro do passo programável, ou o menor passo mecânico que pode ser realizado em uma movimentação ponto a ponto. A resolução é importante pois ela fornece a menor faixa de repetibilidade possível de ser obtida. Na metrologia a resolução é a menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida. A avaliação da resolução é feita em função do tipo de instrumento.

Semeadora de precisão: Segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-010 (1996), é a máquina agrícola que enterra a semente em sulcos, uma a uma ou em grupos, a distâncias regulares, segundo densidade de semeadura preestabelecida.

Semeadora: segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-010 (1996), é a máquina agrícola que realiza a operação de semeadura de espécies vegetais, cuja reprodução é feita por meio de sementes. Suas principais funções são dosar as sementes, abrir o sulco de semeadura, depositar as sementes no fundo do sulco e cobri-las com uma camada de terra.

Sensibilidade: em metrologia, é o quociente entre a variação da resposta (sinal de saída) do sistema de medição e a correspondente variação do estímulo (valor momentâneo de uma

grandeza física). Para sistemas lineares a sensibilidade é constante e para os não lineares é variável.

Seqüência de ajustagem: é ordem na qual os dispositivos de ajustagem são ajustados em um sistema de ajustagem.

Servossistemas: também chamado de servomecanismo é um sistema de controle realimentado em que a saída é alguma posição mecânica, assim servossistema e sistema de controle de posição são sinônimos.

Sistema de ajustagem: é composto pela totalidade dos componentes necessários para a realização da ajustagem. Isto abrange tanto os componentes necessários para atingir e controlar o resultado da ajustagem, quanto aqueles equipamentos necessários para a realização da manipulação. Um sistema de ajustagem pode compreender várias unidades de ajustagem.

Sistemas de controle adaptativos: estes sistemas possuem habilidade de adaptação, isto é, o próprio sistema de controle detecta variações nos parâmetros do equipamento e faz ajustes necessários nos parâmetros do controlador a fim de manter um desempenho ótimo.

Sistemas de controle de aprendizado: são sistemas que possuem habilidade de aprender.

Sistemas de controle em malha aberta: são os sistemas em que a saída não tem nenhum efeito sobre a ação de controle, ou seja, a saída não é medida nem realimentada para comparação com a entrada.

Sistemas de controle em malha fechada: muitas vezes denominados de sistema de controle realimentado, onde o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal realimentado, é introduzido no controlador de modo a reduzir o erro e trazer a saída do sistema a um valor desejado.

Sistemas reguladores automáticos: é um sistema de controle realimentado em que a referência ou a saída desejada ou é constante ou varia lentamente com o tempo, e em que a tarefa principal consiste em manter a saída real no valor desejado na presença de perturbações.

Tarefas: segundo Maribondo (2000), correspondem a cada um dos estágios em que se pode dividir o desenvolvimento de uma etapa. Dentro do processo de projeto, correspondem ao primeiro nível de desdobramento. Tem como um dos objetivos, a redução do nível de complexidade das informações contidas nas etapas.

Técnica: é o conhecimento ou conjunto de conhecimentos de uma arte, isto é, o saber fazer, para o desenvolvimento de uma atividade baseado em leis e critérios preestabelecidos.

Uma semeadora é composta tipicamente pelos seguintes mecanismos que estão envolvidos, e que tem influência na precisão de semeadura:

Unidade de ajustagem: abrange a todos os componentes necessários para a ajustagem em um produto. Ela pode ser composta apenas pelo dispositivo permanente de ajustagem, ou pelos dispositivos permanente e provisório de ajustagem.

Valores de influência: são os valores que indicam a influência da alteração das variáveis de influência sobre as variáveis de saída.

Variáveis de ajustagem: são as variáveis de influência selecionadas para a realização da ajustagem.

Variáveis de influência: são parâmetros geométricos e de materiais dos elementos de um produto.

Variáveis de saída: são parâmetros tidos como objetivo em um produto.

Variável controlada: é a grandeza ou condição que é medida e controlada, normalmente é a saída do sistema.

Variável manipulada: é a grandeza ou condição que é variada pelo controlador de modo a afetar o valor da variável controlada.

RESUMO

Esta dissertação propõe uma metodologia para o desenvolvimento de produtos de precisão, e utiliza diferentes técnicas para alcançar os objetivos pretendidos, com ênfase em sistemas de ajustagem. Isto torna o desenvolvimento de produtos que necessitam de precisão funcional, mais rápido, organizado e metódico.

Este trabalho inicia com um estudo do estado da arte sobre erros, fatores de erros em produtos, sua influência, identificação e minimização, além dos erros que podem ocorrer nas fases de projeto. Também é realizado um levantamento sobre o estado da arte das técnicas para obtenção de precisão funcional, abordando de forma mais detalhada a ajustagem, que revelou-se uma técnica flexível e abrangente. Além disto foi desenvolvido um método para simular a ajustagem, que fornece os valores de correção dos erros.

Após o estudo do estado da arte é desenvolvida a metodologia que integra tais técnicas, com o objetivo principal de desenvolver produtos de elevada precisão funcional, sem no entanto fazer uso de construções com tolerâncias apertadas.

A metodologia foi aplicada em dois estudos de caso de diferentes domínios. No primeiro aborda-se o reprojetado da cadeia cinemática de acionamento do disco dosador de uma semeadora de precisão. O segundo trata do desenvolvimento de configurações modulares em um torno de ultraprecisão. Com estes estudos de caso foi possível constatar a abrangência e a efetividade da metodologia, além disto facilita a visualização do fluxo de informações, orienta a equipe de projetos ao longo do processo de projeto, em relação as etapas a serem seguidas, pois estas estão dispostas de forma adequada ao uso, fornece opções de ações a serem tomadas para a melhoria da precisão. O processo de projeto deixou de ser empírico, tornando-se mais otimizado, a metodologia auxilia na tomada de decisões, tornando as fases do projeto mais rápidas, e conseqüentemente diminuindo o tempo de lançamento de um produto.

ABSTRACT

This dissertation proposes a methodology to the development of precision products, and it uses different techniques to achieve these objectives, with emphasis in adjustment systems, making the development of products needing functional precision, faster, organized and methodical.

This work begins with a study about errors, factors of errors in products, its influence, identification and minimization, along with the errors that can happen along the project phases. A research on the state of the art of the techniques for obtaining functional precision is accomplished, approaching in a more detailed way the adjustment, that revealed itself a flexible and broad technique. Besides, a method that supplies the values of correction for the errors was developed to simulate the adjustment.

After the literature review on the subject, the methodology which integrates such techniques is developed with the main objective of obtaining products with high functional precision, without, however, to make use of tight tolerances.

The methodology was applied in two case studies of different domains. In the first, the redesign of the cinematic drive chain of the seed disk of a precision planter is approached. The second approaches the development of modular configurations in an ultraprecision lathe. With these case studies it was possible to verify the scope and the effectiveness of the methodology, besides that it facilitates the visualization of the information flow, it guides the design staff along the project phases, in relation to the stages to be followed, because the information is organized in an appropriate form, and it supplies options of actions to be observed for the improvement of the precision. The project process is no longer empiric, becoming more optimized. The methodology helps the decision making process, turning the project phases fastest, and therefore reducing the lead time of a product.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Atualmente uma das principais atividades geradoras de riqueza das nações mais industrializadas é a manufatura. Assim um caminho para assegurar um alto padrão e qualidade de vida de um país, é o desenvolvimento, suporte e manutenção de uma indústria manufatureira produtiva e inovativa. Indústria esta que é baseada em avançadas tecnologias, podendo operar com sucesso no mercado mundial, isto é, manufatura de classe mundial operando globalmente.

Segundo McKeown (1997), cada vez mais cresce a demanda por produtos de tecnologia avançada, que são dependentes de processos de fabricação de alta/ultraprecisão. Isto torna necessário o desenvolvimento de sistemas e máquinas de alta precisão, capazes de atenderem a esta demanda. Cabe mencionar que, atualmente a diminuição do tamanho dos lotes e, a diversificação cada vez maior dos produtos, exige que os projetistas tenham conhecimento de metodologias e técnicas de projeto capazes de auxiliá-los a desenvolver produtos de qualidade de forma rápida. Além disto são necessários sistemas de manufatura flexíveis, capazes de se ajustarem de maneira rápida e econômica a este novo cenário produtivo.

As exigências de desempenho em termos de precisão de máquinas e sistemas de medição de alta/ultraprecisão tem aumentado de forma contínua, tanto em termos de tolerâncias geométricas e dimensionais, bem como em qualidade superficial. Contudo estas exigências não podem ser reduzidas continuamente por motivos não somente tecnológicos, mas também físicos, o que torna necessário o desenvolvimento e uso de técnicas e meios que possam compensar tais deficiências. Dentro deste contexto, têm sido desenvolvidas várias técnicas para obtenção de precisão funcional como compensação de erros, técnicas de controle e ajustagem que desempenham um papel fundamental na fabricação de alta precisão, ou seja, é possível produzir máquinas e produtos com elevada precisão funcional, além de componentes de ultraprecisão sem no entanto fazer-se uso de construções com a mesma magnitude de precisão.

Quando não se dispunha das técnicas para obtenção de precisão funcional, como compensação e outras disponíveis atualmente, a precisão dos produtos dependia quase que exclusivamente da precisão de construção da máquina que os produzia, da qualidade de seu projeto, das condições do ambiente em que a mesma se encontra, da perícia em se adotar uma boa estratégia de fabricação, e de uma boa técnica de ajustagem que era feita durante ou depois da montagem.

No caso de máquinas-ferramenta as imprecisões dos componentes, tais como planeza de suas guias causarão imprecisões também na usinagem das peças; no entanto se os erros de planeza das guias forem conhecidos, estes podem ser compensados eletronicamente.

Atualmente com os recursos oferecidos pelos computadores, os comandos numérico computadorizados (CNCs), desenvolvimento de novos componentes, sensores, ferramentas, e sistemas de CAE, CAD e CAM, é possível fazer uma série de correções e compensações dos erros geométricos e de posicionamento em tempo real, isto é, simultaneamente ao uso do produto.

A temperatura e outros fatores relativos ao ambiente constituem uma das maiores causas de erros em ultra precisão, segundo Weck (1995), mais de 50%, pois provocam deslocamentos e deformações nas estruturas dos produtos e máquinas. Os erros termicamente induzidos podem ser corrigidos através de sistemas de compensação, e que simultaneamente compensam os erros geométricos.

Outra maneira de atenuar os efeitos causados pela temperatura é o uso de materiais de baixo coeficiente de expansão térmica. Porém uma técnica que está sendo desenvolvida é a compensação de erros termicamente induzidos. Esta técnica faz uso de sensores, estrategicamente localizados em pontos da estrutura do sistema, através de análises por programas de CAE e em alguns componentes sujeitos a variações de temperatura. As informações obtidas por estes sensores são processadas pelo sistema de controle através de algoritmos. Estas informações são comparadas com um modelo em um computador, que calcula qual o incremento a ser adicionado pelo acionamento da máquina, de forma a corrigi-la, minimizando assim os efeitos da temperatura sobre a precisão da mesma.

A substituição de componentes de máquinas por outros mais precisos, e o uso de técnicas de controle, são outras formas empregadas para a obtenção de precisão funcional.

Uma técnica utilizada onde é necessário precisão funcional é a ajustagem. Hansen (1970), define a ajustagem como sendo o reposicionamento de componentes funcionais durante ou depois da montagem em uma direção sensível a precisão funcional, para que após o reposicionamento, isto é, o ajuste dos componentes funcionais, as funções de todo o sistema técnico possam ser realizadas com a precisão requerida.

Para o desenvolvimento de produtos de precisão é necessário que os conhecimentos de ajustagem e outras técnicas estejam estruturados na forma de uma metodologia que auxilie a equipe de projetos na seleção e aplicação das técnicas e na estratégia de ajustagem.

1.2. OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo propor uma metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, visando otimizar o processo de projeto de produtos onde se requer precisão funcional.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar e apresentar os principais erros em produtos, fontes de erros e sua minimização em produtos e os erros que podem ocorrer no processo de projeto de um produto;
- Levantar o estado da arte de técnicas utilizadas para obtenção de precisão funcional;
- Organizar o conhecimento sobre ajustagem no contexto da precisão funcional;
- Propor uma metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem para produtos genéricos, e para diferentes magnitudes de precisão;
- Testar a metodologia proposta através da sua aplicação em estudos de caso de diferentes domínios para que se possa analisar a efetividade e abrangência da mesma;

1.4. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho justifica-se pelo fato de que o domínio das tecnologias de alta/ultraprecisão são fundamentais para o desenvolvimento da maioria dos produtos de alta tecnologia. Como a qualidade e competitividade de um produto é definida na fase de projeto, é fundamental que as equipes de desenvolvimento conheçam e disponham de ferramentas e metodologias adequadas ao desenvolvimento de produtos que satisfaçam os requisitos para os quais foram idealizados, como a precisão funcional.

Dentro do contexto da ultraprecisão, onde deseja-se cada vez níveis mais elevados de precisão com custos cada vez menores, a utilização de construções com tolerâncias estreitas, acaba por onerar muito o custo dos produtos. Assim sendo, como alternativa pode-se utilizar técnicas de ajustagem que permitem o uso de tolerâncias menos apertadas no projeto fazendo com que o custo de produção baixe, além do que dispensa instalações dotadas de equipamentos extremamente especializados para sua fabricação. Além da fabricação as ferramentas e dispositivos de ajustagem são importantes para o correto posicionamento das máquinas em seu local de funcionamento, e quando as máquinas estão submetidas a um uso muito intensivo, estas estão sujeitas a desgastes, cujos desvios podem ser corrigidos através da ajustagem.

Atualmente verifica-se que o problema da obtenção de precisão funcional tem sido bastante abordada pelas técnicas de compensação de erros geométricos e/ou por deformações térmicas. Pouco tem sido pesquisado a respeito da utilização da ajustagem neste problema, o que talvez explique a pouca literatura a esse respeito. Observa-se que apesar da ajustagem ser uma técnica antiga, tem sido adotada de forma empírica, o que mostra um grande potencial de desenvolvimento e aplicabilidade, e a necessidade de aglutinar e detalhar este conhecimento. Além disto percebe-se a necessidade de estruturar uma metodologia que auxilie a equipe de projeto no desenvolvimento de produtos de precisão que podem ser dotados ou não de sistemas de ajustagem. O objetivo desta metodologia é tornar o processo de projeto destes produtos, sistematizado, rápido e confiável, auxiliando no processo de tomada de decisões através de uma análise criteriosa, de fácil uso e que disponibilize as informações necessárias de forma rápida e objetiva.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos propostos, esta dissertação está estruturada em 6 capítulos da seguinte forma:

No capítulo 2 são apresentadas considerações sobre erros, fatores de erros em produtos e sua influência, identificação e minimização, além dos erros que podem ocorrer nas fases de projeto. Também é realizada uma revisão sobre o estado da arte das técnicas para obtenção de precisão funcional.

No capítulo 3 são abordados de forma mais detalhada os conhecimentos sobre ajustagem, além dos recursos computacionais disponíveis que podem ser usados nas fases de projeto de um produto, de maneira a auxiliar no emprego da ajustagem.

No capítulo 4 é proposta a metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, que é baseada no estudo do estado da arte apresentado no capítulo 2, e que tem como objetivo a obtenção de produtos de elevada precisão funcional;

No capítulo 5 a metodologia é aplicada para avaliar a necessidade do reprojetado da cadeia cinemática de acionamento de um disco dosador de uma semeadora de precisão. Este estudo de caso, tem o objetivo de mostrar a flexibilidade e abrangência da metodologia proposta;

No capítulo 6 a metodologia é aplicada a um estudo de caso no desenvolvimento de configurações modulares em um torno de ultraprecisão. A metodologia será mostrada passo a passo, para que possa servir como exemplo para outras aplicações, além disto é sugerido o projeto preliminar de um dispositivo de ajustagem, e a sequência de ajustagem para a implementação da precisão do torno;

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste trabalho, as dificuldades encontradas, contribuições e recomendações para trabalhos futuros.

1.6. CONTRIBUIÇÕES

O trabalho propicia inicialmente uma visão geral e abrangente sobre os erros, fontes de erros em produtos e sua influência, identificação e minimização, além dos erros que podem ocorrer nas fases de projeto. Através do conhecimento dos erros é possível leva-los em consideração em todas as fases do ciclo de vida do produto, aumentando a possibilidade de obtenção de precisão funcional, e de selecionar meios de forma mais adequada para a melhoria da precisão em produtos.

O conhecimento das técnicas de obtenção de precisão funcional na mecânica de precisão é de grande ajuda, principalmente por propiciar opções de seleção na fase de projeto. Pois para cada problema, há uma técnica e/ou um conjunto de técnicas que podem ser usadas objetivando a melhor relação custo/precisão, sua forma de implementação e aplicação.

O detalhamento da ajustagem permitirá o desenvolvimento da metodologia de projeto de produtos dotados de sistemas de ajustagem, além disto auxiliará o NeDIP - Núcleo Integrado de Desenvolvimento de Produtos e o LMP - Laboratório de Mecânica de Precisão pertencentes ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina na realização de trabalhos futuros envolvendo a ajustagem. O conhecimento a respeito da ajustagem também poderá ser usado na implementação computacional de ferramenta para auxiliar o processo de projeto, e de ajustagem.

A sistematização proposta permitirá a integração de um banco de conhecimento relacionado com o processo de projeto de desenvolvimento de produtos, de modo que a seleção e aplicação dos princípios de solução possam ser facilmente implementados em sistemas CAD e CAE. Em consequência disto o processo de projeto torna-se mais sistematizado metódico e rápido. A rapidez e a organização do projeto favorecerá o desenvolvimento de produtos com qualidade.

Esta dissertação foi desenvolvida conjuntamente entre o NeDIP e o LMP, da UFSC e o IMK - Institut für Maschinenelement und Konstruktion da TUI - Universidade Técnica de Ilmenau, no escopo de um programa cooperativo da CAPES e DAAD - PROBRAL. O projeto específico trata do melhoramento da precisão em máquinas da nanotecnologia, e tem o objetivo de promover uma troca de conhecimento e experiências entre as instituições e seus pesquisadores, sedimentando e integrando ainda mais a experiência na área de projeto e fabricação de produtos de ultraprecisão, e agregando um maior conhecimento sobre a ajustagem que é uma importante técnica no desenvolvimento de máquinas e produtos de ultraprecisão.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE DAS TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE PRECISÃO FUNCIONAL

Um dos pré requisitos para o sucesso no desenvolvimento de produtos, onde busca-se a precisão funcional, é o conhecimento, por parte dos projetistas, das várias técnicas possíveis de serem usadas na obtenção da precisão funcional. Além disto, o conhecimento destas técnicas é fundamental para a sistematização e racionalização do processo de projeto destes produtos.

Segundo McKeown (1997), as técnicas de projeto para obtenção de produtos de alta precisão, são conhecidas e aplicadas com rigor por poucas equipes de projeto no mundo, o que não é surpresa, pois existe pouca literatura abordando este tema de forma objetiva, e poucas universidades e centros de pesquisa possuem cursos específicos na área de projeto de ultraprecisão.

Neste capítulo serão abordadas as várias técnicas usadas para implementar a precisão funcional de produtos. Inicialmente serão abordados os fatores que motivam e justificam o desenvolvimento, uso e aplicação das técnicas para obtenção da precisão funcional, que são os erros e desvios presentes em qualquer produto, fatores estes que podem ocorrer durante todo o ciclo de vida do produto.

A maioria dos produtos estão sujeitos a erros durante todo o seu ciclo de vida, e geralmente tais erros fazem com que o mesmo não desempenhe adequadamente as funções para as quais foi projetado, podendo até inviabilizar o produto. Os erros provocam aumentos nos custos de aquisição em função de ser necessário o uso de meios para atenuá-los, além do aumento dos custos operacionais para que os erros sejam mantidos dentro de limites aceitáveis. Os erros também são responsáveis por imprecisões dos produtos, desempenho inadequado, improdutividade, falta ou problemas de segurança, baixa confiabilidade, e redução do ciclo de vida, entre outras consequências.

Nos próximos tópicos serão abordados mais detalhadamente os erros inerentes ao produto, as causas de erros e seu comportamento, além disto serão abordados também os erros que podem ser introduzidos nas fases de projeto. Os erros oriundos dos processos de fabricação, operação e induzidos por fontes externas, não serão abordados.

2.1. ERROS EM PRODUTOS

Segundo Schilling (1993), um produto sempre executa de forma imprecisa uma função preestabelecida. A figura 2.1 mostra uma representação das variáveis de influência e dos erros individuais da função de um produto. As variáveis de entrada e saída relevantes para a função são, E_{fi} e A_{fi} respectivamente, isto é, são as variáveis que possuem influência na precisão funcional, e descrevem a função desejada. A variável de entrada E_{ni} é irrelevante para a função, isto é, a sua influência é desprezável na precisão funcional. Os desvios ΔE_{fi} e ΔE_{ni} causam erros individuais nas variáveis de saída. Para melhor compreensão dos erros individuais nas variáveis de saída, pode-se tomar como exemplo um mecanismo de quatro barras, que devido aos erros de comprimento em cada barra ΔZ_1 , ΔZ_2 , ΔZ_3 e ΔZ_4 causam os erros individuais nas variáveis de saída de cada barra ΔA_1 , ΔA_2 , ΔA_3 e ΔA_4 , que por sua vez se forem consideradas as suas influências, causarão a imprecisão funcional. As perturbações externas como variação de temperatura ambiente e vibrações, entre outras, são expressas por meio das variáveis Δx_i , que dependendo de sua intensidade podem ter grande influência na precisão funcional. As variações ΔE_{fi} não são analisadas em maiores detalhes devido a clareza com que seus efeitos são observados.

As variáveis Z_i são variáveis internas do produto, as quais só podem ser produzidas com precisão limitada, ou seja, com erros ΔZ_i . Os erros ΔZ_i são afetados por perturbações internas Δq_i , como: aumento da temperatura em função do uso, campo magnético causado por uma bobina entre outros.

Os erros das variáveis de saída funcionalmente relevantes ΔA_{fi} e das variáveis de saída funcionalmente irrelevantes na forma de efeitos colaterais indesejados $(\Delta A_{ni})_u$, e das não prejudiciais $(\Delta A_{ni})_{us}$, dependem das perturbações externas (ΔE_{ni} ou Δx_i) e internas (ΔZ_i ou Δq_i). Elas formam em sua soma a ausência de precisão funcional dos produtos.

Os erros dos produtos são de modo geral, deficiências que os mesmos possuem em não atender adequadamente as funções que devem desempenhar segundo suas especificações, e

compõe-se dos erros individuais que são causados pelas variáveis de influência. Os erros individuais ΔA_i , são agrupados em uma componente de erro correspondente às diferentes funções parciais a serem preenchidas. O erro total que o produto apresenta é a soma das componentes de erro. Além disso é apropriado diferenciar duas parcelas de erro:

- Parcela de erro 1: Contém somente os erros ΔA_{fi} das variáveis de saída relevantes à função.
- Parcela de erro 2: Reúne os efeitos indesejados $(A_{ni})_u$ e $(\Delta A_{ni})_u$, ou seja, as variáveis irrelevantes indesejadas.

A parcela de erro 1 tem prioridade sobre a parcela 2, pois componentes de erro da parcela 1 não podem ultrapassar as restrições, por exemplo especificações de precisão. Com respeito às componentes de erro da parcela 2 deseja-se apenas que estas não surjam ou que mantenham-se pequenas, porém não é feita nenhuma exigência ou restrição formal quanto aos valores máximos permitidos para tais componentes de erro.

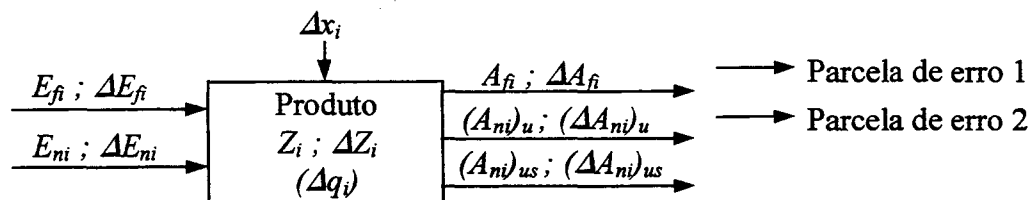


FIGURA 2.1. Erros individuais e variáveis de influência em produtos, Schilling (1993).

Onde:

f	índice relativo às variáveis relevantes à função;
n	índice relativo às variáveis irrelevantes à função;
u	índice relativo às variáveis de saída indesejáveis;
us	índice relativo às variáveis de saída não prejudiciais;
Δ	este símbolo indica desvio;
E_{fi}	variáveis de entrada relevantes para a função;
ΔE_{fi}	desvio das variáveis de entrada relevantes para a função;
E_{ni}	variáveis de entrada não relevantes para a função;
ΔE_{ni}	desvio das variáveis de entrada não relevantes para a função;
Z_i	variáveis internas do produto;
ΔZ_i	desvio das variáveis internas do produto;
A_{fi}	variáveis de saída relevantes para a função;
ΔA_{fi}	desvio das variáveis de saída relevantes para a função;

- $(A_{ni})_u$ variáveis de saída irrelevantes para a função e indesejadas;
- $(\Delta A_{ni})_u$ desvio das variáveis de saída irrelevantes para a função e indesejadas;
- $(A_{ni})_{us}$ variáveis de saída irrelevantes para a função e não prejudiciais;
- $(\Delta A_{ni})_{us}$ desvio das variáveis de saída irrelevantes para a função e não prejudiciais.

Com relação a suas causas e efeitos, os erros podem ser classificados nos seguintes grupos:

- Erros que tem efeitos sobre a qualidade de desempenho da função causados por:
 - Erros de fabricação ΔZ_i na produção dos elementos construtivos, como por ex. erro da dimensão nominal, da espessura, raio e paralelismo.
 - Erros de montagem ΔZ_i , como excentricidade, deformação, local e/ou posição incorreta de montagem, etc.
 - Utilização errônea ΔE_{fi} , ΔA_{fi} , como o uso sob suposições falsas ou inadequadas, condições erradas, leitura errônea ou ambiente não apropriado.
- Erros que tem efeito sobre a precisão. Eles são causados principalmente por uma perda de informação gerando erros ΔE_{fi} , ΔZ_i , ΔA_{fi} dentro ou nas proximidades do produto, como indicação errada ou interpretação errada do sinal dos sensores usados, grupos construtivos de transmissão ou processamento errôneos, grupos construtivos de distribuição errôneos.
- Erros que tem causas específicas no produto, nos quais o princípio funcional escolhido não é adequado ou o projeto é deficiente.

Para melhorar a precisão deve-se tomar as seguintes medidas:

- Reduzir os valores de ΔZ_i através de tolerâncias, compensação e ajustagem;
- Reduzir os valores de ΔE_{fi} através de controle e/ou regulação das entradas;
- Reduzir os valores de E_{ni} e ΔE_{ni} através de interrupção da conexão ou redução das influências por meio de isolamento, blindagem, amortecimento, filtragem...;
- Reduzir os valores de A_{ni} e ΔA_{ni} através de interrupção da conexão ou redução das influências por meio de isolamento, blindagem, amortecimento, filtragem...

Nas fases iniciais de projeto é possível selecionar diferentes estruturas funcionais que permitem que o produto cumpra as mesmas funções para as quais foi projetado, porém estas diferentes estruturas possuem um comportamento de erro diferente para variáveis de influência iguais. Assim sendo um produto (aparelho ou máquina) tem um melhor comportamento de erro em relação a outro, se sob condições iguais resultarem erros individuais menores, os quais não

devem aumentar muito, mesmo para períodos de tempo mais longos. Isto deixa claro que em um projeto é muito importante a seleção de princípios de solução que propiciem elevada precisão funcional.

2.1.1. OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA

O conhecimento para a obtenção, do comportamento das variáveis de influência de acordo com Krause (2000), é necessário para que se possa melhorar o comportamento de erro de um sistema. Porém a investigação das perturbações, isto é, as variáveis de influência que causam os erros individuais mostra-se difícil, pois durante o desenvolvimento de um produto é preciso ser realizada uma considerável investigação destas variáveis. Uma primeira e importante maneira de representar a influência das perturbações é através da equação (2.1).

$$A = f(pa, pb, pc, \dots), \quad (2.1)$$

Onde A representa as variáveis de saída e pa, pb, pc, \dots são parâmetros nominais geométricos e físicos. Se esta equação for dada de forma explícita, então o erro ΔA pode ser calculado através da lei da propagação do erro, atentando-se para as condições que validam o uso desta lei, de acordo com as equações (2.2) e (2.3).

$$\Delta A = \frac{\partial F}{\partial pa} \Delta pa + \frac{\partial F}{\partial pb} \Delta pb + \frac{\partial F}{\partial pc} \Delta pc + \dots \quad (2.2)$$

$$\Delta A = V_{F1} \Delta pa + V_{F2} \Delta pb + V_{F3} \Delta pc + \dots \quad (2.3)$$

As variáveis $\Delta pa, \Delta pb, \Delta pc$ representam os erros ΔE_{fi} e ΔZ_i dos valores nominais. Deve-se atentar que este procedimento só é realizável se as variáveis pa, pb, pc, \dots puderem ser descritas em termos de suas dependências funcionais, isto é, se as variáveis puderem ser escritas na forma típica da equação (2.1); tal procedimento só fornece conclusões boas quando realizado de forma rigorosa, ou seja, somente quando houver uma função que descreve o comportamento dos erros, é possível obter boas conclusões.

Junto a isto, devem ser diferenciados erros escalares de vetoriais, e sistemáticos de aleatórios. O conhecimento das perturbações internas e externas pode ser melhor descrito através da representação em blocos e gráfica, e também de listas de registro de erros.

2.1.2. INSENSIBILIDADE E INVARIÂNCIA

Segundo Krause (2000) os princípios de construção denominados de insensibilidade e invariância, são meios que podem ser utilizados para melhorar o comportamento dos erros de produtos e também a precisão durante longos períodos de tempo. Diz-se que um produto possui estrutura invariante, se a grandeza de saída deste não sofre influência das perturbações a que é submetido. Se, devido às perturbações, surgirem somente erros de segunda ordem ou de ordens mais altas, a estrutura é dita insensível. A equação (2.4) mostra a influência das perturbações nos erros.

$$\Delta A = V_{F1} (\Delta Z_1) + V_{F2} (\Delta Z_2)^2 + V_{F3} (\Delta Z_3)^3 + \dots + V_{Fn} (\Delta Z_n)^n \quad (2.4)$$

Onde:

A = Grandeza de saída

ΔZ_i = perturbações

V_{Fi} = fatores de erro

$V_{F1} \neq 0$ erro de primeira ordem

$V_{Fi} = 0$ erro de segunda ordem ou de ordens superiores

Muitos dos arranjos insensíveis e invariantes conhecidos até o momento caracterizam-se por sofrerem pequena ou nenhuma influência de uma das principais perturbações da mecânica fina, os erros geométricos, dimensionais, qualidade superficial e da posição entre os elementos construtivos (tolerâncias, desvios, etc.). Estes erros surgem das inevitáveis tolerâncias de fabricação e montagem, bem como das alterações de posição e de dimensão devidas ao desgaste e às deformações ocasionadas por forças e pela variação de temperatura. Por isso as estruturas invariantes e insensíveis possuem freqüentemente o objetivo de eliminar totalmente a influência destas perturbações sobre a função do aparelho ou máquina, ou de manter a influência destas a mais pequena possível.

Os arranjos insensíveis e invariantes devem satisfazer sempre dois requisitos: Primeiro deve-se encontrar uma estrutura qualitativa apropriada para o problema. Em segundo lugar esta deve ser dimensionada corretamente. Estes princípios igualmente importantes para a confiabilidade e precisão são ainda muito pouco utilizados, porque atualmente ainda não existem regras de como encontrar uma estrutura insensível ou invariante.

2.1.3. MINIMIZAÇÃO DOS FATORES DE ERROS

Segundo Krause (2000), os fatores de erro V_{Fi} , segundo equação (2.3), informa que para cada erro individual a relação entre as correspondentes variáveis de influência e o erro individual causado por elas são:

$$(\Delta A_i)_1 = V_{F1} \cdot \Delta Z_i; \quad V_{F1} = (\partial A / \partial Z_i)_1 \quad (2.5)$$

$$(\Delta A_i)_2 = V_{F2} \cdot \Delta E_{ni}; \quad V_{F2} = (\partial A / \partial E_{ni})_2 \quad (2.6)$$

$$(\Delta A_i)_3 = V_{F3} \cdot \Delta E_{fi}; \quad V_{F3} = (\partial A / \partial E_{fi})_3 \quad (2.7)$$

Os erros individuais ΔA_i podem ser causados pelos erros e variações nas variáveis de entrada relevantes à função ΔE_{fi} , equação (2.7), pelas perturbações externas não relevantes à função E_{ni} , ΔE_{ni} , equação (2.6), e pelas perturbações internas ΔZ_i , equação (2.5). O tipo da variável de influência é assinalado como 1, 2 e 3. O índice i assinala os diferentes erros, desvios e variações. Quando o fator de erro V_{Fi} é pequeno, o erro individual também permanece pequeno. Para cada grau de redução originam-se arranjos minimizados em erro, insensíveis ou invariantes.

Denomina-se de arranjo minimizado em erro se o fator de erro puder ser reduzido de forma perceptível com relação a situação inicial. Por exemplo através de procedimentos matemáticos de otimização, diminuição das cadeias funcionais ou das cadeias de informação, do uso de elementos construtivos com comportamento não linear.

Arranjos insensíveis surgem quando puderem ser encontradas ou criadas estruturas nas quais o fator de erro é tão reduzido que resultam somente erros individuais de segunda ordem ou de ordem mais alta, conforme a equação (2.4). O fator de erro V_{Fi} assume então a forma:

$$V_F = C \cdot \text{Variável de influência}, \quad (2.8)$$

e o erro individual assume a forma:

$$\Delta A = C \cdot (\text{Variável de influência})^2, \quad (2.9)$$

onde C é uma constante de diferentes valores e a variável de influência é de pequeno valor. Com isto os termos da equação (2.4), com as parcelas não lineares, assumirão rapidamente valores muito pequenos. Assim surgem segundo as equações (2.5, 2.6 e 2.7), erros individuais de segunda ordem ou de ordem mais alta, que são geralmente muito pequenos ou desprezáveis.

O uso consciente de tais estruturas ficou conhecido como princípio de insensibilidade e revela-se de grande utilidade na mecânica fina. Originam-se arranjos invariantes quando o fator

de erro for zero. Com isto o erro individual permanece sempre zero mesmo para grandes perturbações. O uso de arranjos invariantes é também denominado como princípio da invariância.

2.1.4. FONTES DE ERROS QUE INFLUENCIAM A PRECISÃO DOS PRODUTOS

O conhecimento dos aspectos de erros que afetam a precisão funcional de um produto ao longo do seu ciclo de vida, devem ser levados em conta pela equipe de projetos para o desempenho satisfatório de todo sistema técnico, e basicamente estão relacionados ao próprio produto, ao ambiente, às condições operacionais e às entradas. A figura 2.2 apresenta os aspectos de erros mais comuns em produtos objetivando a sua compreensão, para que posteriormente possam ser estudadas as medidas adequadas para atenuá-los e/ou eliminá-los.

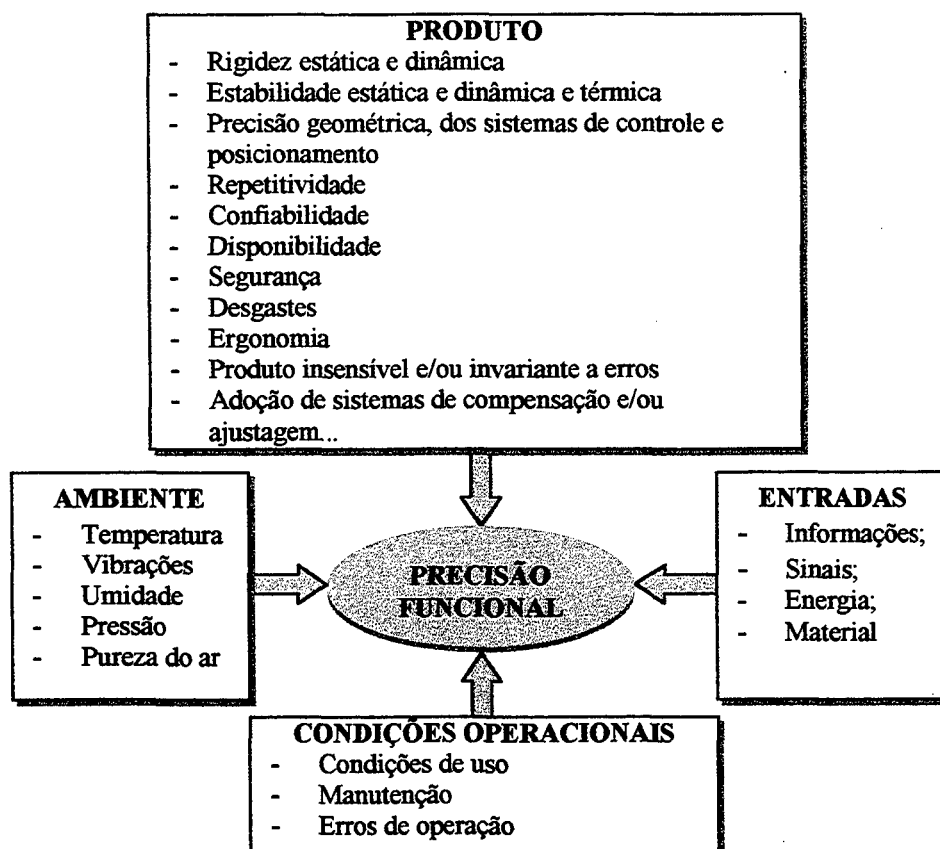


FIGURA 2.2 Fontes de erros que influenciam a precisão dos produtos Stoeterau (1998).

Como pode-se observar na figura 2.2, muitos são os fontes de erros em produtos de precisão. Portanto para confecção de componentes de precisão é necessário o conhecimento de tais fontes, e levar todas elas em conta, de forma a reduzir ao máximo tais influências.

2.1.5. ERROS EM UM CORPO RÍGIDO

Um corpo rígido possui seis graus de liberdade, três em translação nos eixos **X**, **Y** e **Z**, e três em movimento angular de inclinação em torno de **a**, **b** e **c**, como mostrado na figura 2.3.

Quando um corpo é submetido a um movimento este fica sujeito a fatores de erros como: qualidade do projeto (rigidez, confiabilidade, repetitividade entre outras), forças, variações de temperatura e outros fatores que estão mostrados na figura 2.2. Um projeto inadequado pode apresentar baixa estabilidade estática, dinâmica e térmica, o que faz com que possa haver deformações maiores que as previstas no projeto, e conseqüentemente causar erros relativos ao corpo e/ou conjunto de corpos. Estes fatores de erro induzem o corpo rígido a erros nos três eixos de translação **X**, **Y** e **Z**. No caso da figura 2.3, o movimento está restrito ao eixo **X**, e se definem os erros de movimento angular em torno de **X**, **Y** e **Z** chamados respectivamente de rolamento, guinamento e arfagem, unicamente ao corpo em movimento, além dos erros de ortogonalidade e planeza nos planos **XY**, **ZX** e **YZ**.

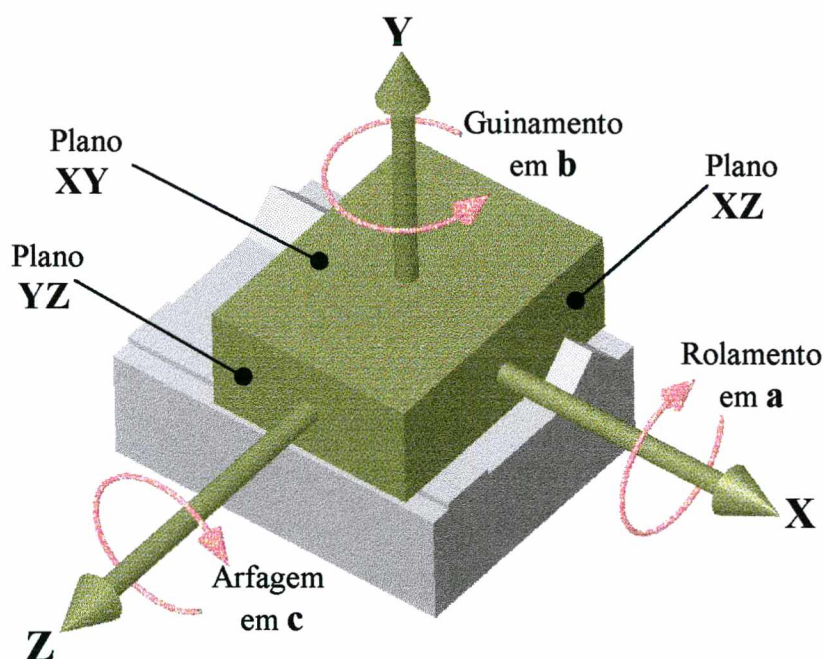


FIGURA 2.3 Graus de liberdade de um corpo rígido.

A relação entre os erros de movimento e as direções do erro torna clara a necessidade de manter pequenos os fatores de erros, e os efeitos de perturbações externas para que os produtos possam desempenhar suas funções atendendo os requisitos para os quais foram projetados, e em especial a precisão funcional. Um erro de um corpo em movimento em um eixo

tem implicação em erros tais como: retilinidade, rolamento, guinamento e arfagem. Portanto isto mostra a importância que deve ser dada aos fatores de erros. A precisão funcional é obtida por meio de um projeto adequado e de prescrições adicionais para a fabricação, para limitar os desvios causados pelas perturbações internas de tal forma que a soma final dos desvios não ultrapasse os valores admissíveis.

2.1.6. COMPORTAMENTO DE ERRO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Para que um produto tenha um bom comportamento de erro, isto é, o erro se manifeste de forma a não prejudicar ou a ter pequena influência na precisão funcional, deve-se tratar com especial atenção os problemas ligados às fontes e aos fatores de erros, já durante as fases iniciais de desenvolvimento do produto. Segundo Krause (2000) o comportamento de erro é muito influenciado durante as seguintes fases do desenvolvimento de um produto:

- Procura pela estrutura funcional;
- Formulação do princípio de solução;
- Detalhamento dos desenhos técnicos.

O ponto principal encontra-se na fase de formulação do princípio de solução antes do detalhamento dos desenhos técnicos. Na definição da estrutura funcional o comportamento de erro pode ser determinado, apesar da abstração inerente.

Se por exemplo na fase de concretização do princípio de solução as considerações teóricas sobre os erros resultarem em um comportamento de erro inadequado, pode-se atingir uma melhoria e uma qualidade completamente nova através da escolha de outro princípio de solução e de uma nova passagem pelas fases anteriores.

Em todas as fases do desenvolvimento do produto deve-se decidir se um erro pode ser tolerado ou se seu efeito pode ser mantido pequeno através da prevenção ou de ações contrárias a ele tais como: ajustagem e compensação.

2.1.7. ERROS NAS FASES DE PROJETO DE UM PRODUTO

Nas fases iniciais de projeto são obtidas informações sobre o produto a ser desenvolvido, seu ciclo de vida, que compreende informações como: o sistema de manufatura, desempenho e ambiente em que irá operar. Em cada informação e fase do projeto, existe a possibilidade de erros. O erro pode ser influenciado por fontes externas como vibrações, temperatura, e também por informações incorretas para o projeto e/ou o não entendimento das

informações. Os erros podem ser introduzidos nas informações e atributos de projeto, por imprecisão em procedimentos, ausência de recursos técnicos e científicos adequados, erros humanos, entre outros.

Segundo Petroski (1991) *apud* McMahon, et al. (1997) os erros podem ocorrer em todas as fases do processo de projeto, mas os erros mais difíceis de serem sanados são os que se originam na fase de projeto conceitual. Estes mais que quaisquer outros erros de projeto, são invariavelmente causados por erros humanos, 75% segundo uma avaliação de falhas em sistemas estruturais realizada por Stewart (1992). Porém deve-se ter em mente que as técnicas de redução de erros dificilmente podem resolver os erros de projeto, principalmente quando ocorrem na fase conceitual. Pois o pré-requisito básico para a minimização dos erros é uma conceituação adequada. O principal emprego das técnicas de redução de erros são para os erros causados pelas limitações técnicas do processo de fabricação, montagem e desgastes decorrentes do uso do produto.

Assim deve-se fazer uso de meios que evitem o avanço dos erros de projeto para a fabricação, com o intuito de maximizar a precisão funcional com custos coerentes. Para isto as técnicas mais utilizadas são as de verificação de projetos. Segundo Back (1983), as técnicas de verificação de projetos mais conhecidas são: verificação por lógica ou suposição, regras matemáticas, unidades e dimensões, simetria, valores limites e a experiência do projetista. Cabe mencionar que a equipe de projetos deve ter qualificação adequada aos projetos que pretendem desenvolver, além disto a equipe deve ser motivada, o fluxo e a obtenção de informações deve ser eficiente, e deve-se ter em mãos os recursos adequados ao desenvolvimento do trabalho.

Um erro que é detectado de forma tardia pode inviabilizar um produto, causa grandes custos de retrabalho no reprojeto e/ou manufatura, e caso o erro não seja eliminado, mas apenas atenuado, o produto corre o risco de nunca satisfazer totalmente os requisitos técnicos para os quais foi projetado.

A figura 2.4, baseada na sistemática de projeto de Pahl, Beitz (1996), apresenta os erros que podem ocorrer nas respectivas fases de desenvolvimento de um produto. Existem fatores causadores de erros que estão presentes ao longo de todo o processo de projeto, tais como: erros de comunicação, as condições de trabalho e treinamento da equipe de projetos entre outras. Estas causas de erros estão representadas na figura 2.4 pela linha traço dois pontos que delimita todas as fases onde estes erros ocorrem, e são detalhadas na tabela 2.1.



FIGURA 2.4. Erros que podem estar presentes ao longo do processo de projeto

O conhecimento da localização e da fonte de erros em projetos pode ser usado para registrar a incidência de causas observadas de erro e retrabalho no processo, e por conseguinte identificar onde é possível atuar para melhorar e aumentar a confiabilidade nas fases de projeto. Isto leva a investigação de onde e porque um erro aconteceu, e conduz a investigar porque o mesmo aconteceu.

TABELA 2.1. Erros que podem estar presentes ao longo de todas as fases de projeto.

Fontes de erros	Exemplo
Erro de codificação	Padrão de comunicação usado incorretamente, ou erro no uso do padrão, usuário falha no entendimento de anotações.
Perda de sinal	Pobre reprodução do desenho, arquivo inadvertidamente apagado.
Ruído no sinal	Vírus de computador, rede com interferência, conversação telefônica sob ruído.
Comunicação incompleta	Padrão de sistemas incompatíveis, problemas de comunicação entre diferentes sistemas computacionais de desenvolvimento de produtos, fabricação e teste.
Falha combinatória	Ausência de falha em atividades individuais, mas erro de interação entre várias atividades.
Desperdício de tempo	Uma análise tão longa que os resultados não estão disponíveis em tempo para outras atividades.
Falha do processo	Erro ou colapso do computador, máquina-ferramenta.
Erro deliberado	Falsificação dos resultados.
Cronograma inadequado	Falta ou excesso de tempo para execução do projeto, má distribuição de tempo entre as etapas de projeto
Atividade insuficientemente completada	Excessiva confiança em aceitar os valores dos dados, e/ou informações Número insuficiente de interações nas análises.
Atividade	Falha em executar avaliações específicas do projeto.
Ambiente	Equipe de projeto sujeita a condições insalubres.
Mão de obra	Equipe desmotivada e/ou pouco qualificada e atualizada
Erro na execução de uma atividade	Erro de impressão na preparação de um desenho. Transcrição de erro, como incorreta leitura de dimensão.

A seguir serão abordadas as principais técnicas para implementar a precisão funcional em produtos. O tema da ajustagem será visto de forma mais detalhada no próximo capítulo pois é o tema principal desta dissertação. Serão apresentados também ferramentas computacionais específicas e programas computacionais de uso genérico, porém com a possibilidade de serem customizados de forma a auxiliar a obtenção da precisão funcional no desenvolvimento de produtos.

2.2. TÉCNICAS PARA OBTENÇÃO DE PRECISÃO FUNCIONAL

O objetivo das técnicas para obtenção de precisão funcional é principalmente de fazer com que sistemas maximizem o desempenho de suas funções dentro de tolerâncias preestabelecidas. Isto pode ser feito através da incorporação de sistemas de ajustagem, ou através de sistemas computacionais de compensação, entre outros que serão vistos a seguir.

2.2.1. PRINCÍPIO DE ARRANJOS COM POUCOS ERROS

Um produto fica qualitativamente definido após a fase de detalhamento dos princípios de solução, então somente são possíveis pequenas alterações dos princípios de solução. Isto deixa claro que as fases anteriores de projeto são decisivas, e é quando existem as maiores possibilidades para que seja alcançado um princípio de solução com um bom comportamento de erro. Os princípios dos arranjos com poucos erros sempre deveriam ser levados em consideração, nas fases de projeto do produto.

Mesmo para um princípio de solução existente, o comportamento do erro pode ser melhorado na fase de concepção através de alterações quantitativas e qualitativas. Uma busca por tais arranjos deve ser meticulosamente executada, uma vez que melhorias consideráveis do comportamento de erro podem ser alcançadas sem custos técnicos e econômicos adicionais. Isto também é evidenciado por Spur (1994), que comenta que o uso de bons princípios de projeto produzem resultados mais eficazes do ponto de vista de precisão funcional, e que o projeto adequado é o pré-requisito básico para minimizar as perturbações do processo de manufatura. Para ilustrar melhor o conceito de arranjos com poucos erros faz-se uso de um exemplo, figura 2.5, que mostra um mecanismo com barra e excêntrico, no qual o princípio de solução é o mesmo, porém o arranjo da figura 2.5b possui um erro de precisão funcional duas vezes menor que o arranjo da figura 2.5a.

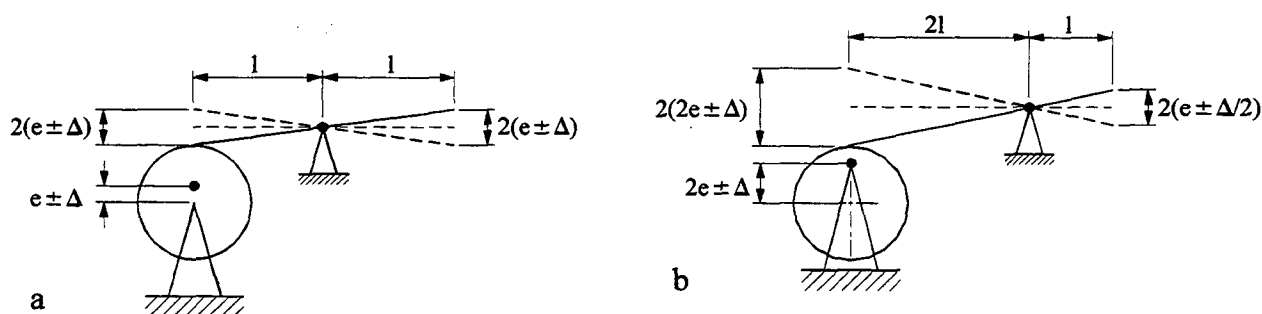


FIGURA 2.5. Mecanismo com barra e excêntrico, Koller (1994).

Também é possível obter-se arranjos com poucos erros através da minimização do fator de erro, uso de técnicas de compensação de erros, ajustagem e de definição de tolerâncias. Além disto existe um grande número de princípios de projeto descritos por muitos autores que podem ser usados para otimizar a precisão funcional, como os mostrados na tabela 2.2, onde é feita uma relação entre os princípios de projeto e os elementos que constituem a estrutura.

TABELA 2.2. Relação entre os princípios de projeto e os elementos que constituem a estrutura, Schilling, (1982).

Princípio de projeto	Partes constituintes da estrutura					
	Elementos				Acoplamentos	Arranjos
	Número	Forma	Dimensões	Material		
1.1. Divisão de funções	+				+	
1.2. Integração de funções	+				+	
2.1. Divisão da estrutura	+				O	
2.2. Integração da estrutura	+				O	
3. Material funcional no local onde a função é executada			O	+		
4. Evitar sobre-restrições	O	O	O		+	
5. Arranjos com poucos erros						
5.1. Redução do erro			O			+
5.2. Insensibilidade		O	O			+
5.3. Invariância		O	O			+
5.4. Compensação	O				O	+
6. Auto-ajuda						
6.1. Auto-fortalecimento			O		O	+
6.2. Auto-compensação			O		O	+
6.3. Auto-proteção			O		O	+
7. Fluxo de força						
7.1. Condução direta e curta da força		+	O			+
7.2. Igual resistência de forma		+	O			
7.3. Deformação regulada		+	O			+
7.4. Compensação de força			O			+
7.5. Ramificação definida		O			+	O

Obs.: o sinal "+" significa forte relação, e "o" significa possibilidade de relação

2.2.2. MELHORIA DO COMPORTAMENTO DE ERRO

A tabela 2.3 mostra as possibilidades de melhoria do comportamento de erro. Estas têm êxito apenas através da alteração da estrutura do produto. Para cada condição de trabalho pode-se alterar características funcionais ou geométricas e de materiais em uma estrutura. Além disto para Krause (2000), na melhoria do comportamento de erro devem ser considerados os aspectos técnico-econômicos tais como:

- Medidas tecnológicas como métodos de trabalho complementar, por ex. ampliar forças de contato através da deformação plástica das molas de contato em um relé;
- Medidas técnico-organizacionais, tais como a seleção dos componentes específicos na montagem, introdução de correções com o auxílio de análises estatísticas, movimentação de módulos e/ou componentes em apenas uma direção, criação de condições de fabricação reproduzíveis, etc.;

- Medidas de projeto, por ex. introdução de elementos discretos de ajuste, uso de unidades de ajustagem de operação estática e dinâmica, utilização dos princípios construtivos dos arranjos com poucos erros, por ex. insensibilidade ou invariância.

TABELA 2.3. Melhoria do comportamento de erro nas fases do desenvolvimento do produto Krause (2000).

Fases	Melhoria do comportamento de erro através de:			
<ul style="list-style-type: none"> • Procura pela estrutura funcional • Elaboração do princípio de solução • Concretização do princípio de solução 	Características da estrutura	Funcionais	Princípio de solução	Correção computacional dos erros individuais no exemplar do aparelho
<ul style="list-style-type: none"> • Detalhamento do projeto 		Geométrico-materiais	Arranjos com poucos erros <ul style="list-style-type: none"> - Minimização do erro - Insensibilidade - Invariância - Compensação ▪ Ajustagem ▪ Definição de tolerâncias ▪ Adaptação quantitativa às exigências 	

Neste contexto a correção numérica através da compensação de erros adquire importância crescente, e será abordada em mais detalhes no item 2.4.

Além disso para igual comportamento de erro da estrutura, os efeitos dos erros podem ser ainda mais reduzidos através de medidas organizacionais direcionadas. Isto realiza-se antes de tudo através da atenção a condições especiais no uso e operação dos produtos relacionados ao comportamento mecânico e térmico destes, como por exemplo:

- Definição de curtos períodos de operação com objetivo de manter uma pequena elevação da temperatura;
- Uso de estratégias apropriadas de operação para reduzir a influência dos desvios e variações aleatórios;
- Evitar a ocorrência de choques em aparelhos de medição para com isto evitar o surgimento de erros devido a vibrações;
- Aproximação da grandeza a ser medida ou ajustada, isto é, adotar uma referência e a partir desta executar as medições, para evitar o erro de inversão devido à folga mecânica ou à histerese mecânica ou elétrica;

- Diminuição da estrutura funcional, isto é, diminuição do número de componentes necessários e envolvidos na realização da função, segundo Bauerschmidt (1975), quanto menor a estrutura funcional maior a probabilidade de haver melhoria do comportamento de erros. Isto se deve ao fato de haverem perturbações internas e nas interfaces de peças e sistemas.

A tabela 2.4 apresenta alguns procedimentos para a melhoria do comportamento de erro, e que servem de auxílio durante o desenvolvimento do produto.

TABELA 2.4 Medidas para melhoria do comportamento de erro, Krause (2000).

Redução de erro											
Através	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Correção do erro ▪ Melhoria do comportamento de erro 										
Medidas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Decisão <ul style="list-style-type: none"> ▪ Através de correção dos erros individuais a serem considerados ▪ Erros individuais que devem ser reduzidos através da melhoria do comportamento de erro 2. Escolha de um princípio técnico adequado (bom comportamento de erro). 3. Registro completo de todas as variáveis de influência que conduzem a erros (meios auxiliares: lista registro, representação gráfica). 4. Determinação teórica dos erros individuais esperados 5. Pesquisa minuciosa para obtenção de arranjos com poucos erros <table border="1"> <tr> <td>Possível através de:</td><td>Com efeito sobre:</td></tr> <tr> <td>5.1 Minimização dos fatores de erros Objetivo: - Arranjos insensíveis - Arranjos invariantes - Arranjos com poucos erros</td><td>Perturbações internas e externas</td></tr> <tr> <td>5.2 Ajustagem</td><td>Perturbação interna</td></tr> <tr> <td>5.3 Definição de tolerâncias (ver item 4.4)</td><td>Perturbação interna</td></tr> <tr> <td>5.4 Compensação</td><td>Perturbação interna e externa</td></tr> </table> 6 Decisão Quais erros individuais devem ser reduzidos através de 5.1 até 5.4. Atenção: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Arranjos com poucos erros: apenas pequeno custo técnico e econômico é necessário; ▪ Escolher apenas tolerâncias realizáveis e economicamente aceitáveis; ▪ Documentos de ajustagem devem ser escritos detalhadamente (prescrição e plano de ajustagem); a ajustagem deve ser inserida no procedimento de montagem e deve conduzir ao objetivo com segurança; ▪ A compensação deve adaptar-se bem às condições especiais (uso especialmente quando da existência de erros variáveis em função das perturbações externas. 	Possível através de:	Com efeito sobre:	5.1 Minimização dos fatores de erros Objetivo: - Arranjos insensíveis - Arranjos invariantes - Arranjos com poucos erros	Perturbações internas e externas	5.2 Ajustagem	Perturbação interna	5.3 Definição de tolerâncias (ver item 4.4)	Perturbação interna	5.4 Compensação	Perturbação interna e externa
Possível através de:	Com efeito sobre:										
5.1 Minimização dos fatores de erros Objetivo: - Arranjos insensíveis - Arranjos invariantes - Arranjos com poucos erros	Perturbações internas e externas										
5.2 Ajustagem	Perturbação interna										
5.3 Definição de tolerâncias (ver item 4.4)	Perturbação interna										
5.4 Compensação	Perturbação interna e externa										

2.2.3. COMPENSAÇÃO DE ERROS

Os sistemas de compensação de erros têm sido usados mais freqüentemente em máquinas de medir por coordenadas MMC, e em máquinas-ferramenta. Os sistemas de compensação de erros são técnicas que usam algoritmos computacionais, implementados no comando numérico computadorizado CNC, das máquinas-ferramenta e MMC. Em alguns casos pode-se usar um computador pessoal PC de apoio, isto ocorre principalmente quando são

compensados simultaneamente os erros geométricos e térmicos. Esta é uma área que tem sido muito pesquisada, e que atualmente está sendo muito desenvolvida, como mostram os trabalhos desenvolvidos por: Lo et al. (1995), Chen (1995), Wu (1989), Sartori (1995), entre outros.

As técnicas de compensação de erros estão sendo implementadas em máquinas-ferramenta para corrigir os erros de posicionamento, e em alguns casos erros de trajetória que são dependentes dos erros de posicionamento, em máquinas-ferramenta cada vez mais complexas, e com um número de parâmetros cada vez maior. Isto se deve principalmente em função do contínuo aumento da capacidade de processamento digital e a custos cada vez menores proporcionados pelo desenvolvimento da microeletrônica. Isto está tornando possível o desenvolvimento de algoritmos e modelos computacionais para compensação de erros cada vez mais completos, e portanto aumentando a precisão funcional. Neste sentido podemos citar os trabalhos desenvolvidos por Eman (1987), Kiridena (1994), Srivastava (1995). O mesmo não ocorre com os sistemas mecânicos, que têm os custos aumentados em proporções exponencial em relação ao aumento de sua precisão.

Segundo McKeown (1997), foram feitos experimentos com MMC, no National Bureau of Standards nos Estados Unidos, no Cranfield Unit for Precision Engineering na Inglaterra, no (PTB) Physikalisch Technische Bundesanstalt na Alemanha, e em outros institutos de pesquisa. Estes experimentos mostraram que a compensação de erros sistemáticos tridimensionais por meios computacionais no volume de trabalho de MMC, podem melhorar a precisão volumétrica entre dez e trinta vezes.

Para otimizar a determinação e o cálculo da precisão volumétrica, e o efeito dos erros angulares de máquinas, Postlethwaite (1999) apresenta um *software* onde os cálculos são feitos a partir dos erros geométricos individuais dos componentes das máquinas.

A compensação de erros, normalmente envolve dois aspectos principais, os erros devido a imprecisões geométricas, e os erros termicamente induzidos. A seguir serão apresentadas com mais detalhes estas duas técnicas de redução de erros. A compensação de erros induzidos pelas forças de corte em máquina-ferramenta, não serão abordados, pois em mecânica de precisão as forças de corte são muito baixas e os erros induzidos por este motivo são baixos.

2.2.4. COMPENSAÇÃO DE ERROS GEOMÉTRICOS EM MÁQUINAS-FERRAMENTA

Segundo Kaiser (1993), com o surgimento e evolução do CNC, além da maior produtividade, também tornou possível que algumas imperfeições mecânicas presentes nas máquinas-ferramenta fossem compensadas eletronicamente. Com isto, a obtenção de erros geométricos pequenos pôde ser alcançada mesmo em uma máquina-ferramenta sem componentes de alta precisão, o que certamente melhora a relação custo/precisão dos equipamentos.

Para Souza (1998), os ensaios de recebimento, realizados na venda do equipamento, não são suficientes para garantir a conformidade geométrica da máquina ao longo de seu ciclo de vida. Os ensaios de máquinas-ferramenta são detalhados pela norma ISO 230 (1996), que é dividida em quatro partes, isto é importante principalmente para uniformizar os procedimentos e padronizar a interpretação dos resultados. Os desgastes do uso normal, ou resultantes de uma colisão, fazem com que os erros de posicionamento e trajetória aumentem. Assim os ensaios e ajustes de compensação devem ser feitos periodicamente.

Os erros geométricos são causados por erros presentes na fabricação e montagem dos diversos componentes mecânicos das máquinas-ferramenta, por desgastes com o uso da máquina, e por erros no sistema de comando. Estes erros fazem com que o posicionamento e a trajetória da ferramenta sejam diferentes daquela programada. Além do que os erros geométricos são mais fáceis de serem corrigidos pelo CNC.

Operacionalmente, a compensação de erros é efetivada a partir de um ensaio geométrico, realizado na máquina para determinar os desvios existentes entre as posições e trajetórias programadas, e as verificadas. Comprovada a existência de erros acima dos valores tolerados, estes desvios são gravados na memória permanente do CNC da máquina, e estes valores de erro serão usados pelo CNC como fatores de compensação, corrigindo a movimentação da máquina em cada posição. A figura 2.6 ilustra um diagrama de blocos de um CNC adicionado de um sistema de compensação de erros em tempo real. A compensação de erros pode ser feita pelo próprio comando através de programação, ou por meio de um computador complementar acoplado ao CNC. Segundo Slocum (1992), existem dois métodos de introduzir os sinais de compensação de erros em tempo real, um é através da introdução destes

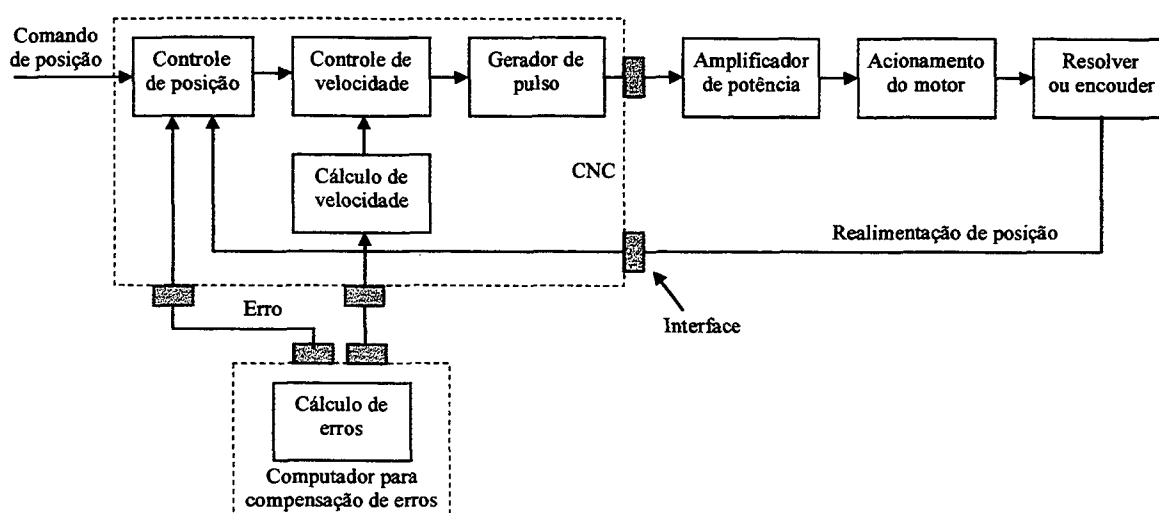


FIGURA 2.6. Diagrama de blocos de um CNC adicionado de um sistema de compensação de erros em tempo real, Slocum (1992).

Como cada máquina possui seus próprios erros, mesmo duas máquinas de mesmo modelo e tamanho, terão seus próprios mapas de erros. Isto torna necessária a confecção de um mapa de erro para cada máquina através de ensaios geométricos.

Erros de posicionamento exigem comandos mais rápidos, menores inércias, ou acionamentos com mais potência.

Já para a compensação dos erros térmicos durante o processo de usinagem, um modelo computacional é criado para descrever o comportamento da máquina em operação, este modelo também pode ser refinado através de ensaios em laboratório. Uma vez construído o modelo, este pode ser aplicado a outras máquinas que tenham as mesmas características de projeto como formas e dimensões, e com as mesmas características operacionais, isto é, realizem trabalhos idênticos. Isto faz com que o comportamento térmico das máquinas de mesmo projeto sejam semelhantes.

A seguir são apresentadas algumas condições que devem ser observadas para a aplicação de compensação de erros por *software* segundo Sartori (1995).

- Podem ser compensados somente componentes de erro sistemáticos e eles devem ser significativamente maiores que erros aleatórios;
- Vantagens esperadas, como a melhoria de precisão, tem que justificar custos de compensação;

- Quando um modelo de erro é usado, a imperfeição do modelo é um limite importante. Qualquer erro gerado durante a fase de medição é interpretado como um erro de máquina e seus efeitos podem modificar erros funcionais, gerando compensações incorretas;
- A máquina tem que possuir um sistema de coordenadas absoluto; e devem ser feitas medidas de erro e compensações de erro com referência a este sistema de coordenadas;
- A resolução da compensação do sistema deve ser feita em função da frequência dos erros. A incerteza da origem do sistema de coordenadas absoluto deve ser mais baixa que o erro a ser compensado;
- Os resultados de compensação via *software* dependem das condições térmicas da máquina e dos instrumentos usados para sua calibração. Esta provavelmente é a limitação mais importante;
- O tempo de resposta do sistema de compensação não deve limitar o desempenho da máquina. Este pode ser um problema quando a compensação é feita em movimento porque os servo acionamentos geralmente têm respostas de tempo mais longas que o CNC.

2.2.5. COMPENSAÇÃO DE ERROS TERMICAMENTE INDUZIDOS DURANTE O PROCESSO DE USINAGEM

A compensação de erros térmicos durante o processo de usinagem, normalmente é executada simultaneamente com a compensação de erros geométricos. No entanto, os erros termicamente induzidos formam o conjunto de erros mais difícil de ser controlado. Estes erros Segundo diversos autores, 40 a 70% dos erros máquinas-ferramenta são termicamente induzidos, portanto esta é a principal fonte de erros. A seguir será descrita uma das formas de controlar os erros termicamente induzidos.

Um modelo computacional da máquina pode ser desenvolvido na fase de projeto, e ser utilizado para otimizar e refinar o projeto, através de medidas adequadas tais como: isolamento das fontes de calor, projeto simétrico entre outras. Assim muitos problemas podem ser atenuados já nas fases de projeto. Da mesma forma o modelo utilizado para otimizar o projeto da máquina-ferramenta através do conhecimento do seu comportamento térmico, também serve para ajudar na localização dos sensores de temperatura que irão compor o sistema de compensação. Além do que esta pré-localização dos sensores também pode ser feita através de ensaios em laboratório. Uma dificuldade do método é a localização adequada de um número mínimo de sensores, de forma que o modelo de otimização com a informação de um número

mínimo de temperaturas ainda garanta uma precisão adequada de predição. A necessidade da minimização do número de sensores se deve ao fato de que muitos sensores tornam o modelo muito complexo, além de exigir uma velocidade de processamento digital muito alta. Outro desafio é o desenvolvimento de um algoritmo de otimização, que reduza o tempo de processamento, e permita elevada precisão dentro de parâmetros aceitáveis de produtividade.

O sistema apresentado por Lo (1995) figura 2.7, se baseia no fato de que a máquina-ferramenta apresenta diferentes erros termicamente induzidos e erros geométricos em diferentes posições e em diferentes intervalos de tempo. Isto ocorre do fato de que a medida que a máquina está operando sua temperatura também muda. Portanto a compensação deve ser executada em tempo real.

O sistema de compensação de erros é composto por um computador, dotado de um modelo de erro em *software* do comportamento ideal da máquina, e um módulo de interfaces. O módulo de interfaces recebe as informações de temperatura dos sensores instalados em pontos estratégicos da máquina-ferramenta, da posição da ferramenta, do número da ferramenta, e do comprimento da mesma. Os sinais lidos dos sensores são processados e comparados com os do modelo de software. Após o processamento, os valores de erros previstos são enviados para o comando CNC, que se encarrega de acrescentar os valores de compensação de erros, de forma que a ferramenta vá para a posição correta.

Segundo Sohlenius (1996), muitas máquinas-ferramenta mais sofisticadas tem a compensação de erros térmicos embutida, baseado no modelo analógico descrito por Lo (1995). Além disto os comandos possuem o conceito de arquitetura aberta oferecendo oportunidades de integrar sistemas de monitoramento sofisticados diretamente no sistema CNC. Assim dados representativos quanto ao estado da máquina podem ser derivados de sensores, sendo o ponto crucial a elaboração de estratégias apropriadas para a detecção de falhas. Por exemplo se uma guia linear ou um mancal estiver danificado, a estratégia é chamar a atenção do operador de forma que o mesmo acione a manutenção, e os reparos possam ser executados. Isto evita eventuais quebras de máquina, bem como usinagens com baixa qualidade e/ou precisão.

Para Chen (1995), em um futuro próximo será comum que os erros termicamente induzidos, erros de Abbe, erros geométricos e desgastes sejam preditos e compensados *on line* por estruturas de rede neural.

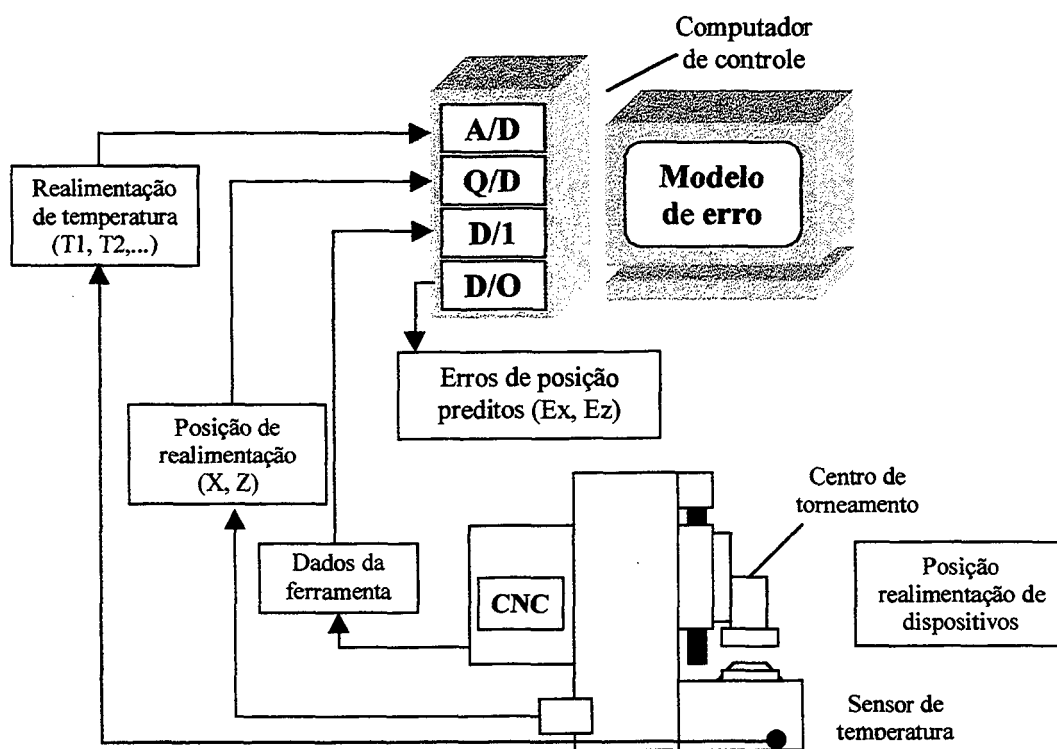


FIGURA 2.7. Controle de compensação de erro em tempo real, Lo et al. (1995).

2.2.6. TÉCNICAS DE CONTROLE

Segundo Ogata (1993), controle significa medição do valor da variável controlada do sistema e aplicação da variável manipulada ao sistema para corrigir ou limitar o desvio do valor medido de um valor desejado.

O requisito básico para qualquer sistema de controle é que o mesmo deve ser estável, além disto a velocidade de resposta deve ser rápida, e o sistema deve ser capaz de reduzir erros a zero ou a um valor tolerável.

Os sistemas de controle são representados por diagramas de blocos e para exemplificar a representação será mostrado na figura 2.8 o diagrama de blocos de um sistema de controle de malha fechada.

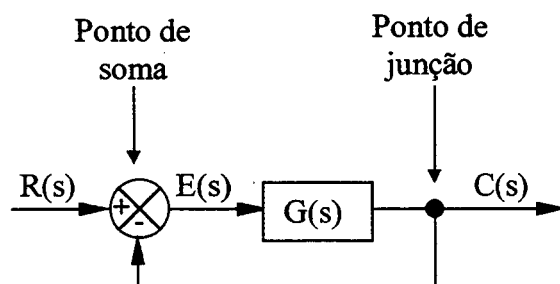


FIGURA 2.8. Diagrama de blocos de um sistema de controle de malha Fechada, Ogata (1993).

Onde: $C(s)$ é a saída realimentada ao ponto de soma, e comparada com a entrada $R(s)$, o sistema de malha fechada está claramente indicado pelo diagrama e a saída do bloco $C(s)$ neste caso é obtida pela multiplicação da função transferência $G(s)$ pela entrada no bloco $E(s)$. Qualquer sistema de controle linear pode ser representado por um diagrama de blocos que consiste em blocos, pontos de soma e pontos de junção.

Os sistemas de controle em função de sua flexibilidade, atualmente tem emprego em praticamente todas as áreas da engenharia como alguns exemplos pode-se citar controle de processos, controle de máquinas ferramenta e seus servossistemas, sistemas de controle de estoques, entre outros.

Para exemplificar a aplicação das técnicas de controle, será feito o uso de um exemplo no domínio de máquinas ferramentas. As técnicas de compensação de erros têm um princípio de atuação similar aos sistemas de controle, aqui a aplicação é focada nos sistemas de monitoramento, que podem ser divididos em sistemas de supervisionamento, de diagnóstico e de controle adaptativo. Será dada ênfase nos sistemas de controle adaptativo. O principal objetivo é o monitoramento em tempo real da forma, dimensões e rugosidade das peças produzidas. Outras aplicações servem para garantir de forma indireta a precisão funcional.

Segundo Wu (1989), os sistemas de controle adaptativo caracterizam-se como sistemas de malha fechada e procuram adaptar automaticamente as condições de usinagem a uma estratégia programada, permitindo que os desvios de trajetórias impostos pelo sistema sejam corrigidos *on line*. Essa correção interessa quando se corrige todos os erros, favorecendo a obtenção da precisão funcional além do limite imposto pelos componentes e sistemas da máquina.

Wu (1989) sugere a utilização de técnicas de controle de previsão e compensação FCC – *Forecasting Compensatory Control* para fazer com que as máquinas convencionais

tenham seus erros sistemáticos e aleatórios compensados através da utilização de avançadas técnicas de leitura em tempo real de modelagens computacionais estocásticas e técnicas de controle de atuadores. Um sistema é determinístico se a resposta à entrada é prognosticável e é repetível, caso contrário o sistema de controle é estocástico. O controle de posição e compensação não é somente um algoritmo de controle, mas um completo sistema de controle, dividido em cinco aspectos principais:

- Medições de erros em processo em tempo real para monitorar todas as variações existentes;
- Processamento *on line* de sinal, para atender as variações e atuar sobre as mesmas;
- Modelamento estocástico para descrever adequadamente o processo dinâmico da máquina e permitir até a previsão deste processo;
- Previsão de erros a partir de condições passadas e atuais do processo, antes que a ferramenta de corte atue no ponto de compensação, dando tempo para que os atuadores criem e executem comandos compensatórios;
- Controle compensatório propriamente dito, com velocidade e precisão adequados.

A seguir será mostrado um esquema de um sistema FCC de controle de previsão e compensação da retilidade, figura 2.9, aplicado a uma fresadora de topo monitorada.

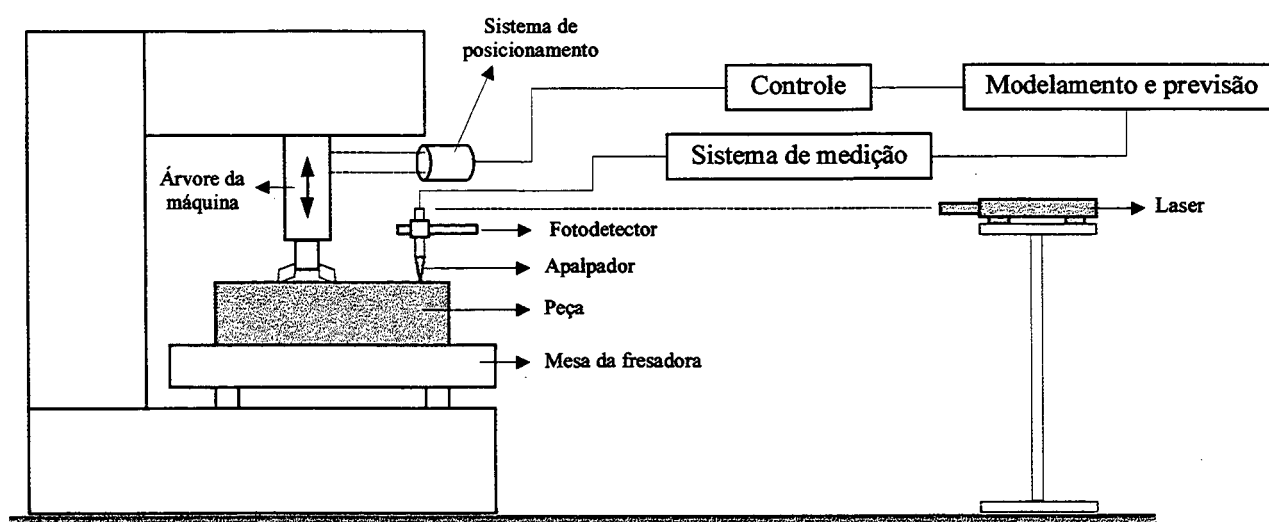


FIGURA 2.9. Diagrama do sistema de controle de retilidade FCC, Wu (1989).

O sistema funciona em malha fechada assistido por um laser de alinhamento. O laser capta as variações da trajetória do cabeçote da fresadora enviando um sinal para que seja acionando o atuador montado no próprio cabeçote, que por consequência altera a profundidade de corte no processo melhorando a precisão funcional.

Os resultados mostraram que este sistema FCC obteve uma melhoria de até 90% na redução de erros, além da melhora da retinidade em até 80%.

2.2.7. SUBSTITUIÇÃO DE MOVIMENTOS EM MÁQUINAS

Segundo Slocum (1992), de todos os movimentos e trajetórias descritas pelos sistemas das máquinas, somente os movimentos que são prejudiciais ao processo de usinagem devem ser avaliados, para saber se atendem ou não aos requisitos de precisão funcional. Assim existem direções de sensibilidade e não-sensibilidade para cada processo de usinagem. Todos os movimentos relativos entre ferramenta e a peça que possuem uma componente normal à superfície que se está produzindo, e refletem-se no contorno da superfície produzida. Uma direção de movimento definida desta forma é chamada de direção sensível. Movimentos perpendiculares à direção sensível não possuem influência sobre a peça que está sendo usinada, caracterizando portanto direções não sensíveis.

Se em uma máquina-ferramenta, suas direções sensíveis apresentam erros maiores que a qualidade da peça a ser usinada, estes movimentos podem ter sua precisão funcional melhorada por dispositivos com movimentos mais precisos. Atualmente existem vários dispositivos e acessórios destinados a implementar a precisão funcional das direções e movimentos sensíveis das máquinas.

Um exemplo disto é o sistema de mandrilamento com ajuste de alta precisão para usinagem de furos Romicon® ROMI (1987), que permite que máquinas convencionais possam usinar furos com ajuste de $1\mu\text{m}$ no diâmetro. Porém é necessário que as máquinas para usarem este sistema estejam em boas condições como poucas folgas e desbalanceamento. Este sistema possibilita atingir um balanceamento próprio classe ISO G1.0, esta classe é destinada a equipamentos de precisão. Assim, mesmo que a máquina não permita a obtenção de furos com este nível de precisão, o uso deste sistema torna isto possível, alterando somente o posicionamento da ferramenta na execução dos furos e do balanceamento do sistema.

2.2.8. AJUSTAGEM

As funções de um produto sempre são executadas com desvios, pois os produtos apresentam diferenças entre as dimensões nominais especificadas no projeto, e as dimensões reais de um produto. Os erros nas dimensões de cada componente de um produto contribuem para o erro total nesse produto. Se estes erros não podem ser eliminados, podem porém ser

mantidos dentro de certos limites de forma que não interfiram na precisão funcional do produto. A ajustagem é uma alternativa importante com a qual o comportamento de erro de um produto pode ser melhorado, quando as outras medidas como projeto invariante, compensação entre outras não proporcionaram a precisão funcional desejada.

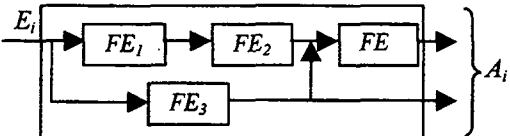
Segundo Hansen (1970), pode-se considerar como exemplo o resultado teórico esperado para a função de um produto denominado R_{th} . Se o produto apresenta um valor R_t , então existe um desvio ΔR na função dado pela equação (2.10), e que deve ser mantido o menor possível, ou pelo menos suficientemente pequeno e dentro de certos limites para o propósito no qual o produto se destina.

$$\Delta R = R_t - R_{th} \quad (2.10)$$

Para reduzir ΔR a um valor aceitável, normalmente as técnicas de fabricação dos componentes, tornam-se caras e refinadas. Como a produtividade e o custo de produção limitam o grau de precisão obtível na fabricação dos componentes, outros meios devem ser encontrados para que se atinja um ΔR aceitável. A ajustagem possibilita a correção dos desvios inerentes ao produto, fazendo com que o produto possa alcançar a precisão funcional requerida pelo projeto sem no entanto fazer-se uso de elevadas precisões construtivas. Em outras palavras a ajustagem pode ser entendida como uma técnica destinada a reposicionar os componentes funcionais que tenham efeito na precisão funcional, de maneira que o produto desempenhe suas funções com a precisão funcional esperada. A tabela 2.5 mostra de forma resumida os principais aspectos que envolvem a ajustagem.

A ajustagem é uma técnica utilizada na mecânica de precisão, e como tal, começou a ser estudada, fundamentada e sistematizada somente nos últimos quarenta anos. Até então a ajustagem era executada através de habilidades específicas e conhecimentos empíricos, e não era conhecida formalmente como uma técnica, o que veio a ocorrer somente depois da organização do conhecimento, e estabelecimento de procedimentos e regras. Foram usados até o presente muitos mecanismos de ajustagem, porém em seu emprego, eram abordados como um princípio de solução para implementar a precisão funcional. Assim a ajustagem não era, e ainda não é em muitos casos usada como uma técnica, dotada de definições, regras, princípios e ferramentas que devem ser usadas desde as fases iniciais de projeto. Isto se deve principalmente ao desconhecimento de muitas equipes de projeto, e a ausência de uma metodologia de sistemas de ajustagem que possa ser empregada desde as fases iniciais de projeto.

TABELA 2.5. Principais aspectos que envolvem a ajustagem, adaptada de, Schilling (1993).

Onde a ajustagem é aplicada	Numa estrutura técnica contendo erros	Máquina, equipamento, grupo construtivo, peça $E_i \rightarrow Z_{i \text{ real}} \rightarrow A_i \pm \Delta A_{i \text{ real}}$ $\Delta A_{i \text{ real}} > \Delta A_{i \text{ adm}}$
Objetivo funcional da ajustagem	Conservar os valores nominais da função dos parâmetros internos Z_i	$Z_{i \text{ real}} \rightarrow Z_{i \text{ necessário}}$ Parâmetros físicos e geométricos
Condições limitantes	Dentro dos limites necessários ao desempenho da sua função,	Condição: $\Delta A_{i \text{ real}} \leq \Delta A_{i \text{ adm}}$
Medidas de ajustagem	Reposicionar componentes funcionais que tenham efeito na precisão funcional de tal maneira que erros da função do produto sejam mantidos dentro de limites aceitáveis.	 <p>Operações de ajustagem:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mudança de posição, forma, propriedades; - Dentro ou fora da estrutura; - Durante a produção, ou pelo usuário; - Manual ou automática

Os primeiros trabalhos sobre ajustagem foram estudos genéricos, apresentados pelo Prof. F. Hansen, em 1967 na TUI - Universidade Técnica de Ilmenau na Alemanha. Este trabalho resultou em um livro que contém, definições gerais, aplicações, e princípios de ajustagem, com enfoque em sistemas óticos. Desde então vários pesquisadores tais como Bauerschmidt (1975), Höhne (1990), Schilling (1993), Nönnig (1999), desenvolveram estudos sobre ajustagem, comportamento, avaliação e modelamento de erros em sistemas técnicos, determinação de algoritmos de ajustagem, e programas computacionais como ILJUR (1995), para simulação do processo de ajustagem. Porém, observa-se que ainda existe a falta de uma metodologia para sistemas de ajustagem que possa ser empregada desde as fases iniciais de projeto e que apresente claramente as ações que devem ser desenvolvidas em cada fase do projeto, que é o que esta dissertação se propõe.

A ajustagem revelou ser de grande utilidade para superar uma série de limitações, principalmente aquelas relativas a obtenção de elevadas precisões funcionais, possuindo um grande potencial para vir a ser muito utilizada. Desta forma pode-se citar os seguintes benefícios quando a ajustagem é empregada:

- Otimização funcional dos produtos;
- Redução dos custos de fabricação e operacionais;
- Otimização da manutenção;

- Compensação de desgastes;
- Melhora da montabilidade;
- Eliminação e/ou compensação dos erros causados pela manufatura e montagem;
- Obtenção de futuros avanços em ciência e tecnologia.

A ajustagem também possui limitações, pois quanto menos precisas forem as dimensões de fabricação dos componentes, mais barato será o custo de fabricação, porém mais sofisticados devem ser os sistemas de ajustagem, tornando-os mais caros. Dessa forma, um dos limites impostos aos sistemas de ajustagem é a definição correta dos campos de tolerância na fabricação, que devem ter um compromisso entre custo e precisão. Tolerâncias muito apertadas podem tornar a ajustagem dispensável, porém os custos de fabricação podem tornar-se proibitivos e em alguns casos pode-se ainda não ser alcançada a precisão funcional esperada. Tolerâncias muito folgadas, podem fazer com que os custos de fabricação sejam baixos o que é uma característica desejável, porém neste caso os sistemas de ajustagem podem ter um custo proibitivo inviabilizando o produto.

Pelo fato de serem componentes mecânicos, os sistemas de ajustagem também estão sujeitos a erros. Devem ser selecionados, dimensionados e localizados através de bons critérios de projeto, caso contrário terão pouca efetividade, ou até mesmo, podem prejudicar a precisão funcional.

A ajustagem pode ser aplicada com grande êxito nas fases de fabricação e uso de um produto, e para os mais variados propósitos, que vão de máquinas de ultraprecisão até maquinaria pesada. A aplicação das técnicas de ajustagem deve ser adequadamente considerada desde as fases iniciais do projeto. Algumas situações típicas onde pode ser aplicada a ajustagem são:

- Quando as características necessárias de um componente funcional, não podem ser realizadas, dentro das tolerâncias disponíveis;
- Em casos onde o movimento de um componente durante ou depois da montagem possa ser feito de maneira mais fácil, segura ou barata do que usando métodos de produção de precisão;
- Em uma estrutura comum para várias montagens funcionais quando é feita depois da conclusão das montagens separadas, ou as várias montagens são realizadas em lugares distintos;
- Se as imprecisões na estrutura principal são desconhecidas ao fabricante das sub-montagens;

- Quando folgas aparecem durante a montagem, devido a imprecisão na fabricação dos componentes individuais;
- Em componentes funcionais submetidos a uso intenso, que apresentem desgastes;
- Nos mecanismos que precisam ajustar-se constantemente a diferentes condições de serviço;
- Na eliminação de etapas do processo produtivo, bem como de máquinas caras e precisas nas linhas de produção.

A ajustagem será abordada de forma mais detalhada no capítulo 3, pois é a principal técnica utilizada no desenvolvimento da metodologia proposta por esta dissertação.

2.2.9. CADEIAS DE MEDIDAS E CADEIAS DE TOLERÂNCIAS

Os erros presentes nas grandezas físicas e geométricas em produtos técnicos estão freqüentemente ligadas umas as outras baseadas em determinadas relações, as características funcionais do produto completo junto as características individuais das grandezas podem desviar dos valores teóricos. Por isto tem-se a tarefa de investigar a influência dos desvios individuais sobre o desvio total. Para Latyev e Nönnig, (1999), o projetista deve conhecer a dependência entre tolerâncias (classes de precisão) e custos, pois só assim é possível desenvolver produtos com uma boa relação custo precisão. A figura 2.10 apresenta a relação entre os custos e tolerâncias.

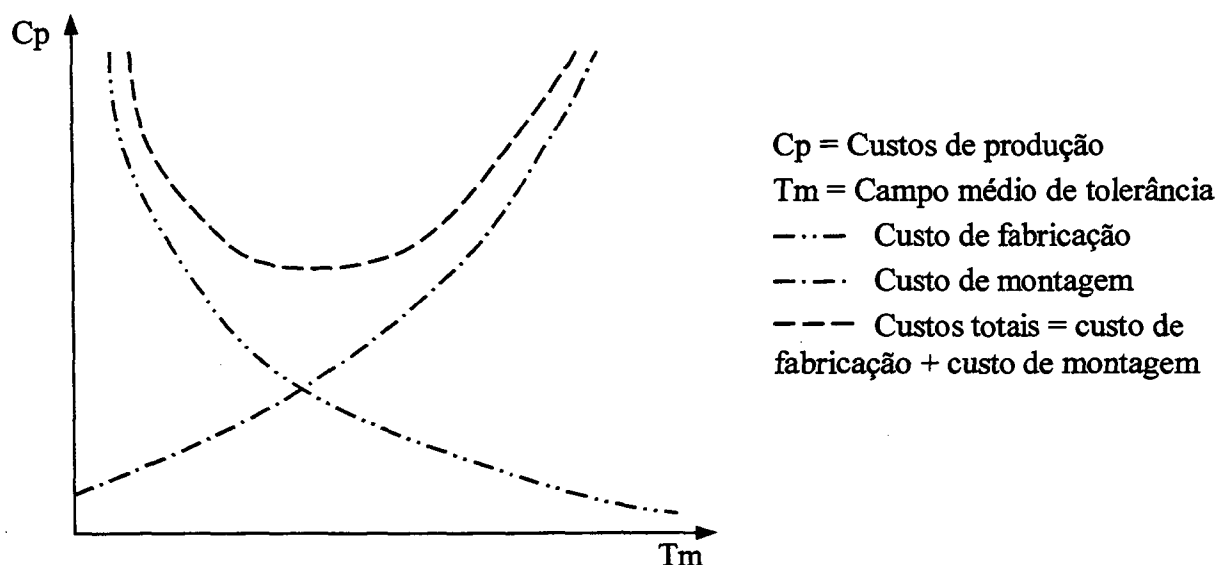


FIGURA 2.10. Relação entre os custos e tolerâncias, Höhne (1990).

Segundo Krause (2000), se diferentes grandezas estiverem baseadas em leis físicas, pode-se descrever matematicamente suas interdependências correspondentes. Estas relações são denominadas normalmente como **cadeias de medidas físicas**.

Igualmente as características geométricas individuais dos componentes também influenciam o comportamento de um produto em especial no que se refere à garantia da segurança funcional e à fabricabilidade econômica.

Por **cadeia de medidas geométrica** subentende-se a disposição em série das medidas individuais M_i atuantes em um produto, componente ou grupo construtivo, e da medida final M_0 . Se houverem cadeias lineares de medidas, cujos componentes forem independentes uns dos outros, então o valor nominal N_0 da medida final M_0 de uma cadeia pode ser calculado como a soma algébrica dos valores nominais N_i das medidas individuais.

Analogamente à cadeia de medidas geométrica, uma **cadeia de tolerâncias** representa a disposição em série das tolerâncias individuais T_i atuantes em um produto, e da tolerância final T_0 , a qual é dependente das tolerâncias individuais. As tolerâncias da mesma forma que as medidas, também formam um trajeto linear fechado em si mesmo. Deve-se atentar que, junto às tolerâncias de medida, também as tolerâncias de forma e posição podem ser componentes de cadeias geométricas de medidas. Por isto deve-se testar sempre se estas tolerâncias aproveitam totalmente ou parcialmente o campo de tolerância de uma medida individual, se elas tornam-se eficazes como medidas individuais independentes ou se eventualmente representam uma medida final determinante à função.

O cálculo das cadeias de medidas e de tolerâncias em produtos possui, em geral, o objetivo de concretizar a tolerância preestabelecida para a medida final de uma cadeia, a qual geralmente provém da função geral. Tais medidas finais podem, por exemplo, ser aquelas cujos limites determinam a função ou a possibilidade da montagem. Em componentes individuais, ao contrário as cadeias são freqüentemente formuladas para converter medidas importantes à função em medidas de fabricação.

Deve-se atentar que a medida final é sempre a medida sobre a qual agem as tolerâncias de todas as outras medidas. Ela não é diretamente fabricada, ao contrário origina-se dos módulos durante a montagem ou em partes individuais indiretamente durante a fabricação. Para o cálculo das cadeias de medidas e de tolerâncias estão à disposição vários métodos, os

quais são utilizáveis dependendo se for exigida uma intercambiabilidade completa dos componentes ou somente uma intercambiabilidade parcial.

2.2.10. MÉTODO MÁXIMO – MÍNIMO

É um método no qual as tolerâncias de cada grandeza de uma cadeia são definidas de modo a manter o valor da tolerância da grandeza final para qualquer arranjo destas grandezas dentro da cadeia, ou seja, para a intercambiabilidade completa das grandezas. Este método não visa a redução ou eliminação de erros mas sim a verificação se estes garantem uma determinada tolerância da grandeza final para a condição de intercambiabilidade completa.

A intercambiabilidade de uma cadeia, significa a capacidade de alterar a posição ou o arranjo das grandezas dentro da cadeia, sem que para tal sua funcionalidade seja alterada. Uma cadeia de intercambiabilidade completa, é uma cadeia que permite qualquer combinação das grandezas dela sem alterar a tolerância da grandeza final.

2.2.11. MÉTODO TEÓRICO DE PROBABILIDADE

Segundo Krause (2000), este método possibilita o cálculo da posição e grandeza das tolerâncias, levando em consideração a distribuição estatística de cada medida individual (distribuição Normal, uniforme, de Simpson, etc.) e a probabilidade de ocorrência das diferentes combinações de tolerâncias (por exemplo: a probabilidade de ocorrer erros positivos máximos em todas as medidas da cadeia).

2.2.12. MÉTODO DA AJUSTAGEM E COMPENSAÇÃO

Métodos de ajustagem e compensação são utilizados se, após aplicação do método máximo–mínimo ou do método teórico de probabilidade, resultarem tolerâncias individuais muito pequenas as quais seriam economicamente inviáveis ou não poderiam ser garantidas através da fabricação. Então define-se de forma adequada tolerâncias individuais grandes para os componentes da cadeia. Isto faz com que a tolerância final seja ultrapassada e portanto uma compensação deve ser realizada através de um elemento de ajustagem e compensação previamente estabelecido.

2.2.13. MÉTODO DA INTERCAMBIABILIDADE DE GRUPOS

Neste método os componentes individuais são fabricados com tolerâncias relativamente grandes e economicamente viáveis. Depois sucede uma classificação em n grupos

de tolerâncias e um emparelhamento correspondente somente aos componentes destes grupos, através disto pode-se respeitar uma tolerância final preestabelecida. Entretanto as tolerâncias totais dos componentes da cadeia devem ser de igual dimensão, e devem poder ser divididas em uma quantia igual de tolerâncias individuais igualmente grandes, caso contrário o caráter da combinação de um grupo com outro será alterado.

2.2.14. ANÁLISE DE CADEIAS DE TOLERÂNCIAS E DE MEDIDAS AUXILIADA POR COMPUTADOR

Em cadeias complicadas tem-se a possibilidade de utilização do computador. Os programas contém por exemplo para cadeias lineares de medidas:

- Cálculo da medida final a partir de m medidas individuais; determinação da medida final conforme desejado para intercambiabilidade completa ou incompleta através de algoritmo de teste durante a análise.
- Cálculo de uma medida individual a partir da medida final e das medidas individuais restantes; determinação de uma medida individual qualquer para intercambiabilidade completa ou incompleta.
- Geração iterativa da distribuição de probabilidade da medida final a partir de distribuições empíricas, de mesma classe de largura, das medidas individuais independentes como variáveis aleatórias.

Segundo Zocker *et al*, (1999), está sendo desenvolvido na Universidade Técnica de Ilmenau um sistema computacional chamado ASM-OPT320 com o objetivo de otimizar os grupos de tolerâncias para a redução dos custos de qualidade e do controle de fabricação que podem ser controlados em tempo real. Isto é feito através da definição cíclica dos grupos de tolerância e da correção dos parâmetros do processo através de uma estratégia de montagem adaptativa e seletiva. Os grupos de tolerância são otimizados e manipulados em função da correteza de sua sequência, da capacidade de ser solucionado e do grau de dificuldade numérico e algorítmico.

Em anos recentes muitas pesquisas tem sido desenvolvidas para otimizar os produtos do ponto de vista de tolerâncias principalmente com ajuda computacional. Muitas publicações tem sido apresentadas e entre elas pode-se destacar: Tolerâncias para funções, por Weill (1988), detecção de cadeias de tolerâncias por análise de acoplamentos baseadas em restrições geométricas, por Söderberg (1999), além de várias publicações sobre Tolerância assistida por

computador, foram feitas no 4º Seminário de Design CIRP na Holanda em 1995. No entanto ainda existem muitos desafios a serem vencidos nas técnicas que envolvem tolerância assistida por computador, em função da grande complexidade de se modelar as tolerâncias de forma adequada para a implementação computacional.

2.3. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Os erros em produtos podem ser originados nas fases de projeto através de especificações não adequadas, erros de comunicação, equipe de projeto não qualificada entre outras. Em função disto, deve-se atentar para um adequado gerenciamento dos recursos humanos e materiais no departamento de projeto, de forma a minimizar os erros em produtos oriundos de tais causas.

Uma adequada estruturação funcional, e a seleção de princípios de solução invariantes e/ou pouco sensíveis a erros são medidas que tem grande influência e efetividade na precisão funcional dos produtos, e devem ser sempre levados em conta pela equipe de projetos em qualquer produto onde a precisão é um requisito.

As equipes de projeto que trabalham no desenvolvimento de produtos de precisão devem conhecer os tipos de erros presentes nos produtos e o que causa tais erros, quais os fatores de erros aos quais os produtos estão submetidos. Isto serve para orientar os projetistas nos cuidados a serem dispensados com o projeto, como o uso de soluções invariantes. Para casos onde não seja possível alcançar a precisão desejada, este capítulo apresenta várias técnicas para a melhoria da precisão funcional, sendo que algumas delas estão mostradas na tabela 2.6, que faz uma breve comparação entre as várias técnicas, de forma a permitir uma análise objetiva entre suas vantagens e desvantagens.

As considerações sobre erros, e as várias técnicas utilizadas para a redução de erros servirão de embasamento para a estruturação da metodologia de projeto de produtos de precisão com ênfase em sistemas de ajustagem, que será apresentada no capítulo 4.

A ajustagem será vista de forma mais detalhada no próximo capítulo, pois trata-se da principal técnica para a melhoria da precisão funcional, utilizada na metodologia. Além disto a ajustagem é uma técnica que só recentemente começou a ser sistematizada, e que tem grande potencial de aplicação, porém é ainda pouco conhecida.

TABELA 2.6. Comparativo entre as várias técnicas e ferramentas para a redução de erros.

Técnica/Ferramenta	Vantagens	Desvantagens
Princípio de arranjos com poucos erros	Dever sempre ser levada em consideração em função de bons resultados em relação a precisão funcional. Torna os produtos simples confiáveis e baratos.	Deve sempre ser implementada nas fases iniciais de projeto, requer mão de obra altamente especializada. É de difícil implementação em reprojotos.
Compensação erros geométricos	Custo de implementação relativamente baixo; boa precisão funcional; fácil uso e manutenção; em máquinas ferramentas dotadas de CNC não é necessário dispositivos e/ou módulos adicionais; compensa desgastes. Pode ser implementada em todas as fases do ciclo de vida do produto.	Como cada máquina tem seu mapa de erros deve ser feito um ensaio para cada máquina. Em produtos que não tenham a direção sensível acionada, e não possuam CNC o método não é aplicável.
Compensação erros térmicos	Compensa uma das maiores fontes de erros, os erros termicamente induzidos; tendência a uma forte evolução junto com o potencial computacional, eletrônica de controle e sensores; apresenta boa precisão funcional; juntamente com os erros térmicos pode compensar também os geométricos; aplicável de forma viável somente em situações específicas.	Custos mais elevados; maior complexidade de implementação, pois necessita de um sistema de sensores interligados em um computador e ao CNC; dificuldades na localização dos sensores; requer mão de obra altamente qualificada; viável somente em equipamentos sofisticados como máquinas- ferramenta de ultra precisão.
Ajustagem	Aplicável a qualquer tipo de produto e nível de precisão; elevada eficiência na redução de erros; pode implementar outras funções ao produto; compensa desgastes; otimização da fabricação e montagem, bem como os erros oriundos destes processos.	Necessidade de sistemas e/ou dispositivos; limitações no número de posições onde deseja-se precisão funcional; pontos de ajustagem são função do tipo de sistema de ajustagem ou de seu número; necessidade de programas específicos para ajustar várias posições, e de mão de obra qualificada.
Cadeias de medidas e cadeias de tolerâncias	Estas técnicas não visam a correção de erros mas a obtenção de precisão funcional. Melhora a fabricação e montagem através de parâmetros adequados proporcionando boa relação custo precisão.	São técnicas de difícil modelagem, são limitadas para obtenção de elevadas precisões além de apresentar elevados custos nestes casos.

CAPÍTULO 3

AJUSTAGEM

Este capítulo abordará especificamente a técnica de melhoria da precisão conhecida como ajustagem. Serão abordados aspectos fundamentais tais como: definições, classificações dos sistemas de ajustagem, configurações, movimentos utilizados na ajustagem e a representação que é feita através de circuitos. Também serão apresentadas recomendações para um melhor desempenho dos sistemas de ajustagem, além disto serão abordadas algumas formas de preparar as informações necessárias para o projeto dos sistemas de ajustagem, bem como formas de se estruturar um plano de ajustagem.

No final do capítulo serão vistas várias ferramentas computacionais desenvolvidas com o objetivo de otimizar o projeto, e simular o processo de ajustagem. Destaca-se aqui uma forma computacional totalmente paramétrica desenvolvida no NeDIP, para simular o processo de ajustagem, bem como determinar as tolerâncias necessárias dos ajustes para a obtenção da precisão funcional desejada.

3.1. DEFINIÇÃO DE AJUSTAGEM

A ajustagem é definida por Hansen (1970), como sendo o reposicionamento de componentes funcionais, isto é, o ajuste dos componentes funcionais, durante ou depois da montagem em uma direção sensível a precisão funcional, para que, após o reposicionamento, as funções de todo o sistema técnico possam ser realizadas com a precisão requerida. O reposicionamento serve para a correção da posição dos componentes funcionais. Em geral, somente alguns componentes, que têm um efeito específico na precisão funcional devem ser movidos. Não é necessário que todos os componentes funcionais estejam em sua posição teoricamente correta. Quase sempre é suficiente que os componentes possuam uma posição relativa bem definida entre si, mesmo que não estejam nas posições previstas pelo projeto. Um exemplo disso é mostrado na figura 3.1. Mesmo que os espelhos não estejam montados na

posição ideal mostrada na figura 3.1a, o sistema da figura 3.1b cumprirá perfeitamente sua função na reflexão da luz.

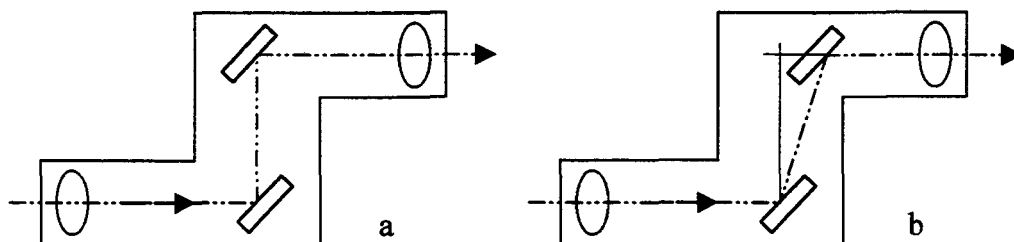


FIGURA 3.1. Posições possíveis dos refletores para a reflexão paralela de um feixe de luz, Hansen (1970).

Uma definição mais geral de ajustagem leva em consideração outros campos de conhecimento como: óptica, elétrica, acústica, termodinâmica, etc., que não são abrangidas pela definição puramente mecânica apresentada.

A ajustagem é uma técnica diferente das técnicas de controle, porém ambas tem o mesmo objetivo que é melhorar a precisão funcional dos produtos. Na técnica de controle a direção de movimento de reposicionamento é acionada e controlada por um algoritmo que faz o reposicionamento do componente funcional de maneira que possa atender os requisitos de precisão. Na ajustagem não necessariamente a direção de movimento de reposicionamento precisa ser acionada, e controlada por um algoritmo que faz o reposicionamento do componente funcional, isto é, pode ser totalmente manual, ou realizada somente por dispositivos mecânicos.

Características gerais da ajustagem:

- A ajustagem é um processo realizado uma única vez em sistemas estáticos. Nos sistemas dinâmicos cada ajuste pode ser usado para diferentes posições onde deseja-se a precisão funcional, por exemplo em um mecanismo. Outro caso acontece quando um sistema precisa se ajustar de maneira que atenda a diferentes solicitações impostas por diferentes condições de uso. Assim cada operação de ajuste é usada para que o produto atenda os requisitos para os quais foi projetado para cada condição de uso;
- A ajustagem deve ser de fácil introdução no procedimento de montagem;
- O ajustador está em geral incluído no processo de ajustagem e realiza a comparação com o valor nominal e o ajuste requerido. Existem cada vez mais soluções nas quais a ajustagem é feita por equipamentos automáticos;

- Após a realização da ajustagem, nem todos os meios auxiliares necessários ao sistema de ajustagem e que atuam sobre o mesmo, precisam continuar no produto ou mesmo colaborar na realização da função;
- Os tempos gastos na execução da ajustagem em um sistema estático, são longos quando comparados com o tempo exigido por alguns sistemas dinâmicos e sistemas de compensação de erros. Considerações críticas quanto ao tempo se referem principalmente aos custos.

Características específicas de uma ajustagem:

- A variável a ser ajustada possui um valor dentro de uma faixa de valores;
- A ajustagem deve ocorrer em um circuito fechado;
- A variável a ser ajustada é medida e comparada com um valor nominal;
- O ajuste deve ser executado com a resolução (precisão de ajustagem) exigida;
- A faixa de ajuste deve garantir a realização do maior ajuste possível;
- O ajuste deve conduzir de forma segura em um curto espaço de tempo, ao resultado desejado.

Se as características específicas estão atendidas, então trata-se da forma mais simples de ajustagem, a qual é identificada como **ajustagem determinada**. Se determinadas características específicas não forem preenchidas, por exemplo as variáveis a serem ajustadas constituem-se de um par de valores ou de uma quantia de valores, então a ajustagem torna-se mais difícil. Tais ajustagens são caracterizadas como **ajustagem indeterminada**, as quais deve-se evitar sempre que possível, e para as quais deve-se tomar medidas especiais.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE AJUSTAGEM

Os sistemas de ajustagem podem ser classificados quanto a seu tipo como:

- **Puramente mecânicos;**
- **Eletromecânicos.**

Quanto a sua forma de atuação podem ser classificados em:

- **Manuais:** requer a ação de um agente externo, o operador, para que o processo de ajustagem possa ser executado.
- **Automáticos:** podem executar o processo de ajustagem, através de uma ação indireta do operador, ou de forma totalmente automática sem que haja qualquer interferência do ajustador.

Quanto a sua forma de implementação podem ser classificados em:

- **Sistemas estáticos:** este sistema de ajustagem requer que o produto não esteja em funcionamento. Estes sistemas possuem ajustagem fixa, isto é, uma vez ajustado o sistema permanecerá apto a desempenhar suas funções com um determinado ajuste durante um período de tempo, e dependendo do produto, pode não necessitar de reajustes até o fim de seu ciclo de vida. No entanto os sistemas estáticos podem sofrer uma reajustagem, por exemplo, com o propósito de manutenção, exemplo: ajuste da mira de uma espingarda.
- **Sistemas dinâmicos:** estes sistemas de ajustagem podem atuar mesmo que o produto esteja sendo usado, além do que a ajustagem pode ser feita de forma contínua ou descontínua em relação ao tempo. Estes sistemas podem fazer uso das técnicas de controle para serem automatizados, exemplo: ajuste da mola de um balancim de relógio.

3.3. CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE UM SISTEMA DE AJUSTAGEM

Para Schilling (1993), a configuração básica de um sistema de ajustagem é composta dos componentes, mostrados na figura 3.2. Os sistemas de ajustagem são compostos por unidades de ajustagem, e podem apresentar diversas configurações. Uma destas configurações que apresenta apenas o dispositivo permanente de ajustagem, é útil em casos onde podem haver reajustagens no produto, ou quando o acoplamento do dispositivo provisório se mostrar inviável por motivos como transporte, tempo entre outros.

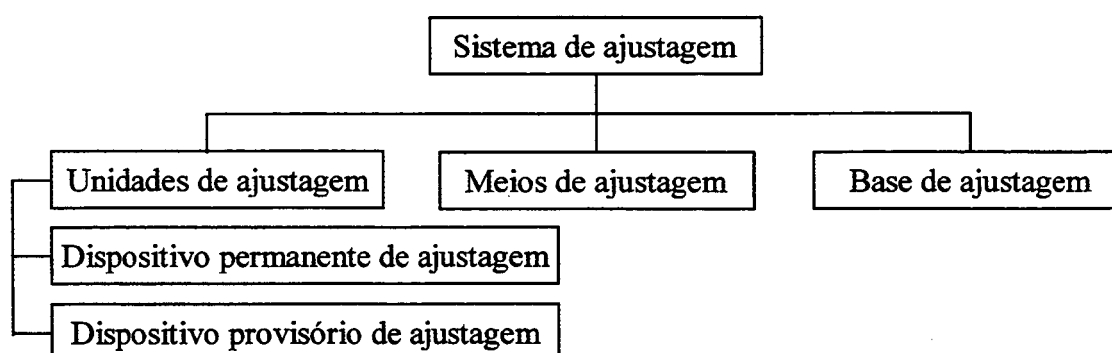


FIGURA 3.2. Componentes de um sistema de ajustagem, adaptado de Schilling (1993).

As configurações compostas pelos dispositivos provisório e permanente de ajustagem são muito utilizadas em casos onde o equipamento será ajustado apenas uma vez durante seu ciclo de vida, ou quando se mostrar viável o acoplamento do dispositivo provisório de ajustagem. Esta configuração tem a vantagem de que os produtos ficam com menos

componentes, e em muitos casos um dispositivo provisório de ajustagem pode ser utilizado para ajustar vários produtos, portanto diminuindo os custos.

3.4. TIPOS DE MOVIMENTOS EM PRODUTOS

Na fase de projeto conceitual quando estão sendo desenvolvidas as concepções dos sistemas de ajustagem, é importante conhecer que tipo de movimento relativo que existirá entre os constituintes dos princípios de solução, de forma a auxiliar a identificar as fontes de erros, direções sensíveis, modelamento e simulação dos sistemas de ajustagem. Além disto um determinado movimento de ajustagem pode ser precedido de outros tipos de movimento, por exemplo: uma ferramenta pode através de um movimento de posicionamento ser localizada próximo ao objetivo que se deseja, porém será posicionada de forma precisa por um movimento de ajustagem. Hansen (1970), classifica estes movimentos em quatro tipos, sendo indicados por abreviações como vistos a seguir:

- **Fixo:** cuja abreviação é (*fi*), quer dizer que a posição do componente vai variar com relação à posição nominal somente de acordo com a tolerância de fabricação, não podendo ser alterada durante a montagem ou a ajustagem, figura 3.3a;
- **Posicionável:** cuja abreviação é (*po*), significa que a posição do componente não está determinada com exatidão, mas seus limites de movimento são previamente conhecidos. A ajustagem não pode exceder esses limites, figura 3.3b;
- **Ajustável:** cuja abreviação é (*ad*), para este tipo de movimento a posição final do componente pode ser alcançada com auxílio de um dispositivo de ajustagem, figura 3.3c;
- **Móvel:** cuja abreviação é (*mo*), significa que o componente pode ter sua posição alterada durante o uso ou em pausas entre sessões de uso. Esta alteração pode ser efetuada pelo próprio usuário, figura 3.3d.

Existe um outro tipo especial de posicionamento no qual a posição do componente com relação à referência pode ser alterada através de remoção de material do componente (retificação, brunimento entre outros) ou pela adição de um espaçador, como blocos padrão ou fitas com espessura controlada. Este tipo de posicionamento é chamado de **adaptável**.

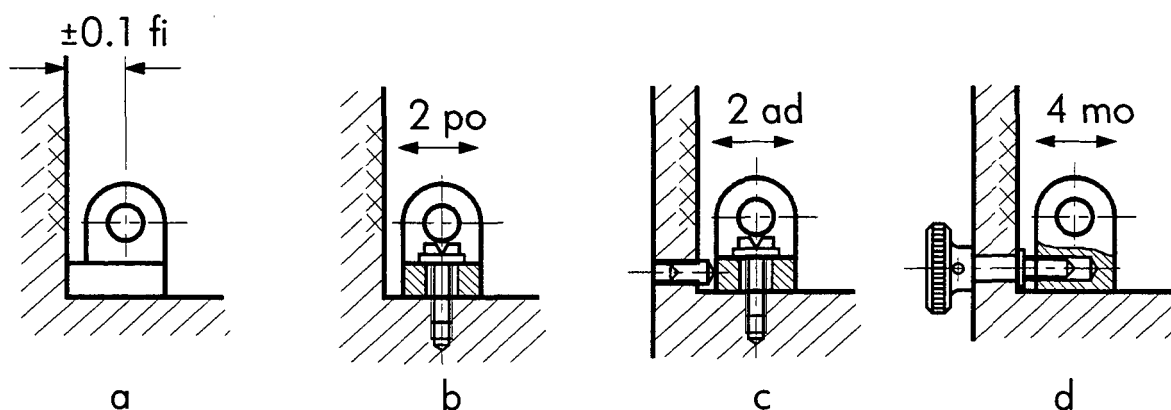


FIGURA 3.3. Tipos de movimentos: a) fixo, b) posicionável, c) ajustável, d) móvel, Hansen (1970).

3.4.1. TIPOS DE MOVIMENTOS DE AJUSTAGEM

Segundo Hansen (1970), existem movimentos lineares, angulares e circulares ou uma combinação destes que podem ser feitos durante o processo de ajustagem para que se obtenham os ajustes necessários de forma que o produto possa cumprir as funções para as quais foi concebido. A figura 3.4 apresenta os tipos de movimentos e suas combinações possíveis usadas na ajustagem.

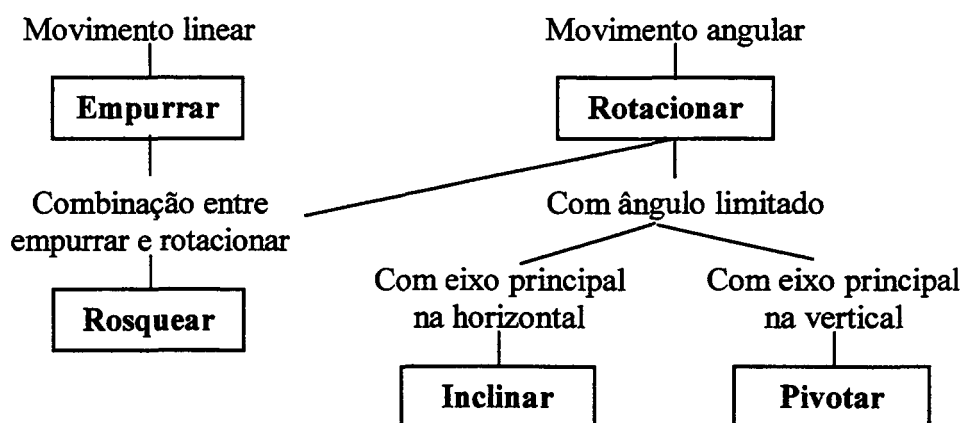


FIGURA 3.4. Tipos de movimentos usadas na ajustagem, Hansen (1970).

O símbolo básico para indicar a direção de um movimento é uma seta. Os movimentos de ajustagem podem ser resumidos em cinco símbolos básicos, como mostra a figura 3.5. Para definir de forma mais completa um movimento de ajustagem, este deve especificar o tipo, direção, sentido, quantidade, e em certos casos, também a sensibilidade, que será definida no próximo tópico. Além disto estes símbolos podem ser combinados uns com os outros de forma que possam representar todas as possibilidades de movimentos possíveis.

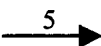

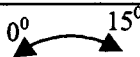


Símbolo	Designação	Significado
	Seta reta	Empurrar na direção horizontal, sentido da esquerda para a direita, 5 unidades.
	Círculo	Empurrar em qualquer direção sobre um plano
	Seta curvada	Rotacionar paralelo ao plano do desenho no sentido horário, 15 graus.
	Ângulo agudo	Inclinar, pivotar
	Ângulo reto	O movimento é perpendicular ao plano do desenho

FIGURA 3.5. Símbolos básicos para indicar as direções de movimentos, Hansen (1970).

3.5. FAIXA DE AJUSTE E SENSIBILIDADE

Para uma definição mais completa dos movimentos de ajustagem estes podem ter informações como faixa de ajuste e sensibilidade que serão definidos a seguir. **Faixa de ajuste** (Fa), é determinada pela equação (3.1), e serve para que seja determinada a quantidade de movimento funcional necessário para que se possa executar a ajustagem, isto é para que possam ser corrigidos os desvios do componente funcional. No cálculo da Fa sempre devem ser consideradas as tolerâncias de Pi e Pn , além da possibilidade de haverem situações onde os desvios podem ser maiores que um caso específico.

$$Fa \geq Pi - Pn \quad (3.1)$$

Onde:

Pi = Posição inicial do componente funcional, isto é, antes do ajuste, devido por exemplo às tolerâncias de fabricação, a precisão de montagem, e a outras influências;

Pn = Posição nominal do componente funcional, especificada no projeto.

Durante o processo de ajustagem um fator relacionado aos movimentos, chamado de **sensibilidade** (Se), é muito importante e deve ser levado em consideração. Pois quanto menor é o movimento necessário para a execução de uma ajustagem, mais difícil fica a execução de movimento. Por isso, é necessário que este curso funcional para a ajustagem seja executado por um dispositivo que possua um curso atuante maior, dando mais sensibilidade ao sistema de ajustagem. A sensibilidade, que é determinada pela equação (3.2), é necessária pois em muitos casos o curso funcional é muito pequeno. Os sistemas de ajustagem com alta sensibilidade fazem com que curso atuante seja de uma magnitude muito maior facilitando a execução da ajustagem.

É importante destacar que a sensibilidade deve fazer com que o movimento do componente funcional o reposicione com facilidade e rapidez na tolerância indicada para a posição nominal.

$$Se = \frac{Ca}{Cf} \quad (3.2)$$

Onde:

Ca = Curso atuante, definido como a quantidade de movimento usada na entrada do sistema de ajustagem.

Cf = Curso funcional, definido como a quantidade de movimento necessária utilizada para ajustar o componente funcional, isto é, a quantidade de movimento necessária para a correção de um desvio.

Tanto a faixa de ajuste quanto a sensibilidade devem ser investigadas para cada local de ajustagem, com o objetivo de garantir a precisão funcional a um custo otimizado. Além disto o conhecimento da Fa e da Se é importante nas fases de projeto para que se possa selecionar os princípios de solução dos sistemas de ajustagem. Estes por sua vez devem ser capazes de realizarem a quantidade de movimento suficiente aos ajustes necessários, e com uma sensibilidade que permita movimentos de entrada pouco precisos facilitando a execução da ajustagem.

A figura 3.6 mostra um exemplo de faixa de ajuste e de cálculo de sensibilidade para um suporte que deve ser ajustado de forma precisa na direção vertical, para isto faz-se uso de uma cunha.

$Pn = 30 \pm 0,01$ mm; $Pi = 29,9$ mm; então $Fa \geq 0,11$ mm.

Se $\alpha = 0,5^\circ$; $Cf = 0,1$ mm; $Ca = 11,5$ mm, então $Se = 11,5 / 0,1 = 115$.

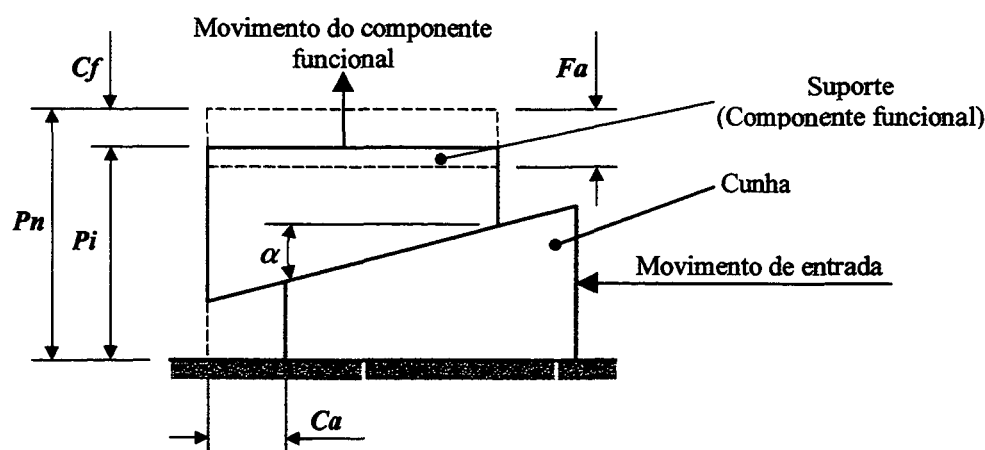


FIGURA 3.6. Exemplo de sensibilidade e faixa de ajuste.

3.6. CIRCUITOS DE AJUSTAGEM

A ajustagem pode ser representada com o auxílio de um circuito de ajustagem, como mostrado na figura 3.7, onde o ajustador (pessoa ou máquina automática) registra através de um equipamento de medição os valores dos parâmetros importantes para a função do produto, compara estes com os valores nominais preestabelecidos, e depois realiza o reposicionamento necessário que irá influenciar o comportamento do parâmetro Z_i do produto por meio do dispositivo de ajuste. Estes parâmetros podem ser corrigidos até que a função (precisão funcional) do sistema seja alcançada.

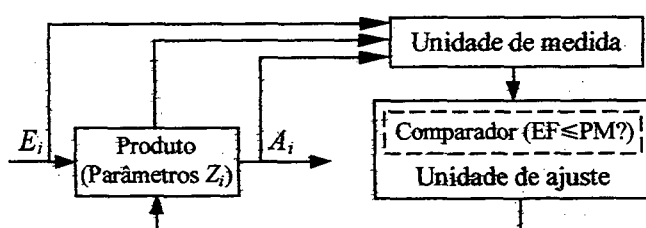


FIGURA 3.7. Circuito de ajustagem, adaptado de Schilling (1993).

Os circuitos de ajustagem também servem para mostrar o inter-relacionamento entre as várias unidades de ajustagem que compõe um produto, quais são as variáveis de saída, de entrada, quais os parâmetros a serem ajustados, as influências e dependências entre as variáveis. Também é possível observar-se a seqüência em que as unidades de ajustagem que compõem um sistema de ajustagem devem ser ajustadas.

Os circuitos de ajustagem podem se apresentar de várias formas, que serão definidas a seguir.

- **Circuito de ajustagem aberto:** este tipo de circuito depende da ação do ajustador que precisa utilizar a ajustagem sucessiva para atingir o objetivo, de forma interativa, em vários passos, este tipo de circuito é mostrado na figura 3.8. A execução da ajustagem com circuitos abertos a grosso modo exige ciclos com 2 passos cada:
 - a) Determinação do erro funcional através de medição por diferença entre o valor nominal de projeto e o valor medido da variável de saída;
 - b) Ajuste da dimensão desejada.

Os ciclos são repetidos na seqüência indicada até que a precisão na indicação seja suficiente. Ao aproximar-se do objetivo a dimensão de cada passo é iterativamente reduzida. Se, devido a cálculos de dimensionamento ou medições de laboratório, puder ser obtida uma relação

gráfica ou em forma de tabela entre a alteração na indicação e a alteração em uma dimensão a ser ajustada, então a ajustagem é significativamente facilitada, pois pode-se, devido a uma medição, alcançar em um ciclo o objetivo através do ajuste.

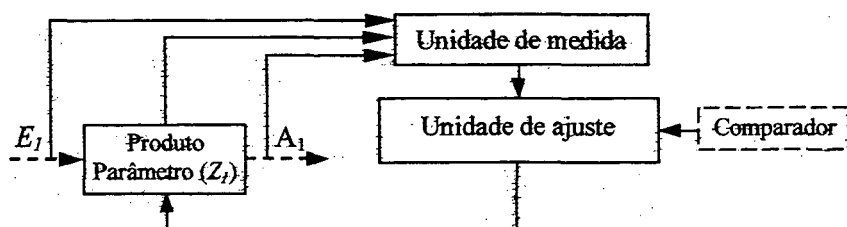


FIGURA 3.8. Circuito de ajustagem aberto.

- **Circuito de ajustagem fechado:** não requer necessariamente a interferência do ajustador, pois este circuito é dotado de um sistema que lê os dados de saída A_i , e compara com o valor desejado de precisão. Caso a precisão não tenha sido alcançada, o valor de saída é comparado com o valor de precisão desejada para gerar um valor de correção. A seguir o valor de correção é usado por um sistema de ajustagem para ajustar o desvio do parâmetro interno Z_i . Este procedimento cíclico de ajustagem é executado de forma sucessiva até que os valores de precisão desejada tenham sido alcançados. A figura 3.9 mostra a representação de um circuito de ajustagem fechado.

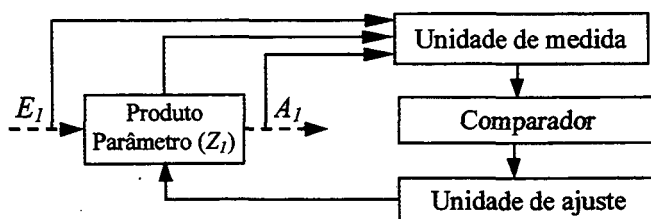


FIGURA 3.9. Circuito de ajustagem fechado.

Os processos de ajustagem estão ligados com alto custo em termos de tempo, penosas atividades manuais e exigem muita experiência para serem realizados corretamente. A exigência pela redução do tempo de ajustagem e pela automatização do processo de ajustagem levou a constatação de que a ajustagem pode ser melhorada com uma otimização do processo iterativo, isto é, aproximação iterativa rápida ao objetivo de ajustagem. Os circuitos de ajustagem tem um melhor desempenho, quando se utiliza uma compensação para a variável de ajuste. Além disto pode-se introduzir uma adequada automatização de modo que o elemento humano não seja mais necessário como ajustador. Através de técnicas de controle pode ser alcançado um procedimento automático do processo.

- **Circuito de ajustagem desacoplado:** A figura 3.10 mostra um circuito de ajustagem desacoplado, onde o valor da variável de saída A_1 que depende da variável Z_1 não influencia o valor da variável de saída A_2 que depende da variável Z_2 , e vice versa, pois os circuitos não estão acoplados um ao outro, isto é, os circuitos de ajustagem 1 e 2 são independentes. Esta é uma forma simples e objetiva de ajustagem, e deve ser sempre tida como meta no projeto de sistemas de ajustagem. Um circuito de ajustagem simples pode ser aberto ou fechado.

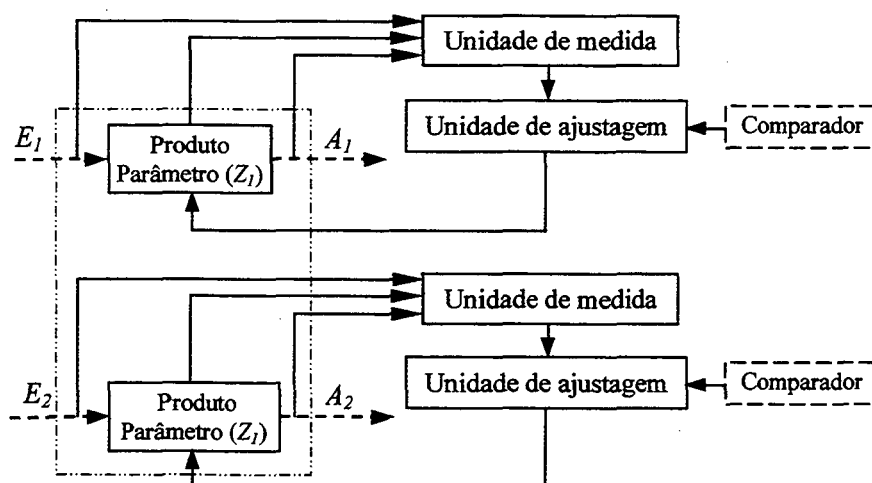


FIGURA 3.10. Circuito de ajustagem simples.

- **Circuito de ajustagem acoplado:** neste tipo de circuito, o valor da variável de saída A_1 que depende da variável Z_1 influencia o valor da variável de saída A_2 que depende da variável Z_2 , e vice versa. Os circuitos estão acoplados um ao outro através das conexões que acoplam os circuitos 1 e 2 representadas pelas linhas tracejadas em vermelho. Desta forma alterações quer sejam na variável Z_1 ou Z_2 produzirão alterações em ambas as variáveis de saída A_1 e A_2 . Estes tipos de circuitos sempre que possível devem ser evitados. Pois em caso de ajustagem manual resulta, em um procedimento de tentativa e erro. Para atenuar este problema um algoritmo de ajustagem apropriado pode ser usado para definir um procedimento para todo o sistema de ajustagem, o qual possibilita uma ajustagem rápida e objetiva, isto é, obtém-se valores de ajuste de forma tal que os valores de saída interfiram uns nos outros dentro de limites aceitáveis. A figura 3.11 apresenta um circuito de ajustagem acoplado. Um circuito de ajustagem acoplado pode ser aberto ou fechado.

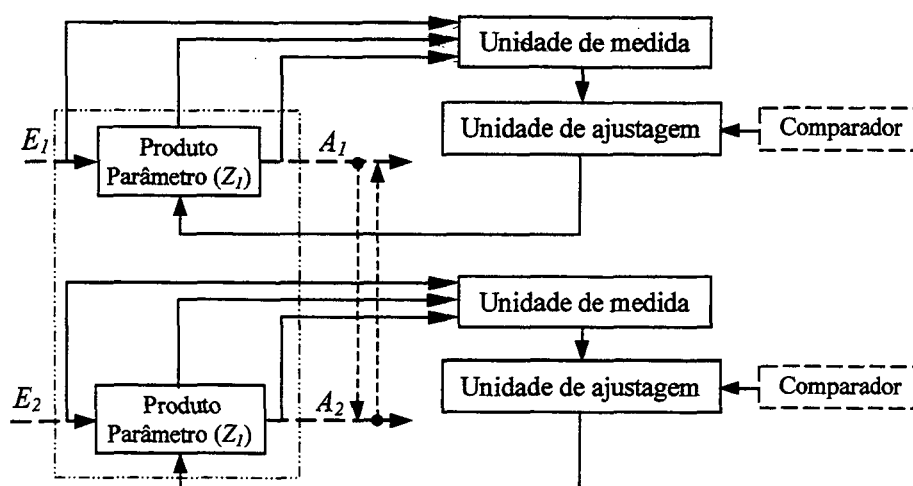


FIGURA 3.11. Circuito de ajustagem acoplado.

- **Circuitos de ajustagem acoplados e circuito simples adicional:** a figura 3.12 mostra esquematicamente a possibilidade do uso de um circuito simples adicional.

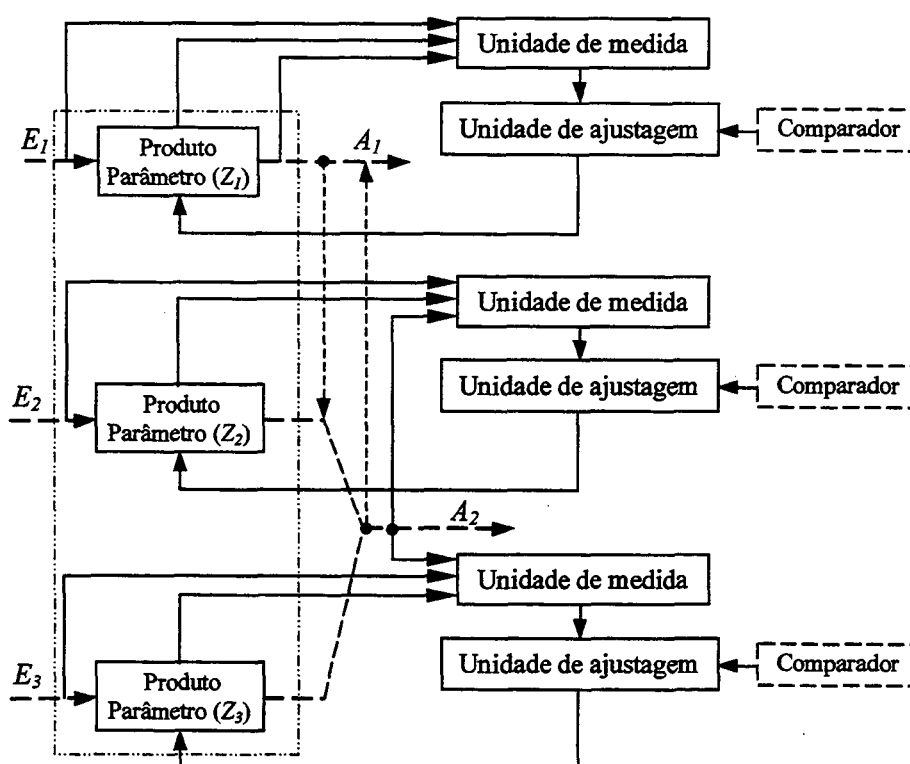


FIGURA 3.12 Circuitos de ajustagem acoplados e circuito simples adicional, Höhne (1990).

Com este circuito pode-se facilitar muito a ajustagem dos circuitos acoplados 1 e 2. Através de Z_1 ou Z_2 , basta um circuito de ajustagem. A_1 é ajustada ao seu valor nominal, com isso A_2 é alterada devido ao acoplamento. Através da ajustagem em Z_3 pode-se ajustar em seguida A_2 a seu valor nominal. Este método tem grande importância quando confronta-se com

movimentos de ajustagem de diferentes dimensões para os diferentes circuitos, isto é, a conhecida **ajustagem-fina-grosseira**.

- **Circuitos de ajustagem em paralelo e em série:** a figura 3.13 apresenta de forma esquemática estas duas formas entre outras comumente encontradas de circuitos de ajustagem, e podem se apresentar na forma aberta ou fechada, além disto são apresentadas possíveis situações de ajustagem e seus respectivos circuitos.

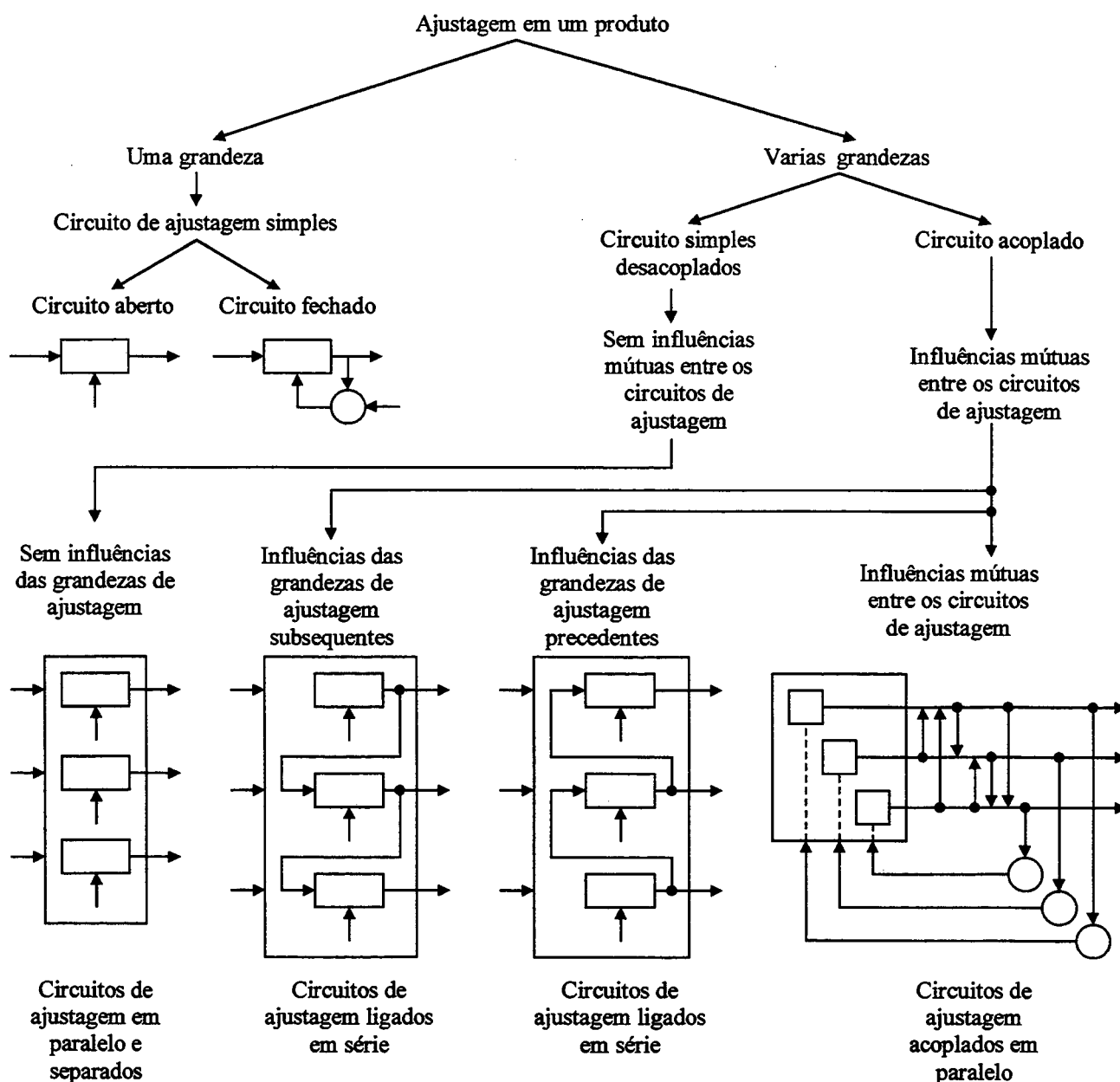


FIGURA 3.13. Esquema das possíveis situações de ajustagem e seus circuitos, Nönnig (1995).

Os procedimentos de ajustagem devem fazer com que este processo seja simples e fácil de ser executado, e leve a resultados ótimos. Para tanto, cada processo de ajustagem deve

ser considerado em detalhes. Através da ajustagem especialmente as perturbações internas que ocorrem durante ou após a montagem são influenciadas. Assim medidas de ajustagem devem ser planejadas já no desenvolvimento do produto, através disto a estrutura do produto é formada de modo a favorecer à ajustagem, e procedimentos adequados de ajustagem são definidos. A decisão com respeito a isso é freqüentemente difícil. Por isso, o conhecimento a respeito das particularidades da ajustagem são muito importantes.

A tabela 3.1 mostra possibilidades de situações de ajustagem e suas características. Pode-se tirar conclusões a respeito da melhoria das possibilidades de ajustagem através das medidas dadas apresentadas.

TABELA 3.1. Quadro das situações de ajustagem, e suas características, Krause (2000).

Situações de ajustagem	Características		
	Um valor discreto	Circuito de ajustagem simples:	Ajustagem sem problemas
1. Tipo das variáveis de saída	Vários valores discretos	Vários circuitos simples de ajustagem:	Ajustar várias vezes na sequência correspondente
	Valores funcionalmente dependentes	Circuitos de ajustagem acoplados:	<ul style="list-style-type: none"> - Desacoplar os circuitos de ajustagem e ajustar várias vezes na sequência definida; - Uso da ajustagem sucessiva; - Uso de compensações; - Uso de um circuito simples de ajustagem adicional
2. Tipo de circuito de ajustagem	Fechado	Ajustagem contínua	
	Aberto	Ajustagem descontínua (sucessiva)	
3. Tipo de registro de informações	Registro de:	Variáveis de entrada Variáveis de saída Variáveis internas Variáveis combinadas	

A ajustagem mais simples e objetiva ocorre quando há um valor discreto como variável de saída. Quando a ajustagem decorre em um simples circuito fechado, isto é, a variável de saída é medida, comparada com o valor nominal e a diferença observada é compensada através de ajustagem.

Os problemas tornam-se maiores, quando esta configuração simples não for possível. Deve-se examinar com especial atenção os circuitos de ajustagem acoplados. Este é o caso quando várias variáveis da saída estão disponíveis em um aparelho e devem ser ajustadas, sendo estas influenciadas por vários parâmetros internos Z_i . Neste caso também se fala em ajustagem indeterminada, ao contrário de ajustagem determinada típica dos circuitos simples.

Para se proceder a ajustagem de forma objetiva também é importante levar em consideração os dois requisitos básicos, e as regras que serão vistas no tópico 3.8. Os dois requisitos básicos não podem ser preenchidos em todos os casos. Portanto nos casos mais complicados deve-se então tomar outras medidas como mostradas na tabela 3.1. Além destas medidas podem ser empregados os seguintes procedimentos:

- Para a condição de saída de uma variável a ser ajustada, esta poderia ser definida muito pequena ou muito grande em relação ao valor nominal, o objetivo disto é tornar mais claro o início do procedimento de ajustagem, pois assim pode-se visualizar mais facilmente a variável a ser ajustada;
- Para aproximar o resultado de ajustagem ao valor nominal por apenas uma direção, ou seja, aproximação unilateral ao objetivo.

3.7. TIPOS DE AÇÃO DE AJUSTE

A forma mais comum de ajustagem é através de movimentos já descritos nos itens anteriores, porém existem várias outras possibilidades de se executar a ajustagem, isto é, através de diferentes formas como os descritas a seguir:

1. Alterações em forma, exemplo: limando, esmerilhando, dobrando, revestindo, etc;
2. Trocando componentes;
3. Inserindo componentes adicionais (também removendo, como inserção negativa), por exemplo: alterações em massa, compensação, alterações através de inserção calços, etc.

A alteração de quantidades secundárias dependentes, como pressão, temperatura, umidade, tensão etc., pode ser alcançado através de um destes quatro tipos de atividade.

3.8. RECOMENDAÇÕES PARA A AJUSTAGEM

Segundo Hansen (1970), quando um projetista for definir de que maneira uma ajustagem completa de um produto deverá ser feita, deve levar em consideração dois requisitos básicos:

- **O primeiro requisito:** uma seqüência de ajustagem de um produto pode ser dividida em vários passos de ajustagem, que devem representar uma ação definida e independente dos outros passos de ajustagem realizados. Isso quer dizer que os ajustes devem ser executados sem que uma nova ajustagem interfira no ajuste realizado anteriormente.

Um processo de tentativa e erro na ajustagem só é desejável para casos onde se busca otimizar a eficiência da execução das funções do sistema ajustado.

- **O segundo requisito:** uma ajustagem é muito mais fácil e rápida se somente um único componente funcional ou unidade de ajustagem necessita ser movido, em uma única direção. Se mais de um componente funcional necessita ser movido, é necessário um processo de tentativa e erro, o que torna a ajustagem mais difícil e demorada, ou é necessário fazer-se uso de sistemas computacionais que possam auxiliar a ajustagem.

Para diferentes produtos, o processo de ajustagem individual e a sequência de ajustagem completa variam consideravelmente. As necessidades de ajustes em cada produto dependem muito de condições particulares, exigindo abordagens específicas para cada caso. Além dos dois requisitos básicos listados anteriormente, alguns aspectos devem ser considerados para a aplicação de métodos de ajustagem:

1. Um bom sistema de ajustagem resulta numa boa combinação de unidades de ajustagem. O sistema de ajustagem deve fazer com que o produto apresente o desempenho necessário com o menor número de unidades de ajustagem, e a um baixo custo;
2. A sequência de ajustagem completa deve ser dividida em passos de ajustagem individuais de modo que cada passo de ajustagem crie perfeitas condições para a ajustagem subsequente;
3. Os ajustes devem ser definidos de modo que as tolerâncias de fabricação sejam as maiores adequadas;
4. Cada ajustagem deve possuir o menor número de posições de ajuste possível, a ajustagem deve ser otimizada com relação às tolerâncias de fabricação exigidas e características necessárias de precisão do sistema;
5. Para cada ajuste, existe um número mínimo de posições de ajustagem necessário para que a função do sistema seja adequadamente otimizada. Assim, não deve-se ter um número de posições de ajustagem menor do que o necessário e também não excedente.
6. Cada unidade de ajustagem deve possuir um certo número de possibilidades de movimentos, o qual não deve ser excessivo nem insuficiente.

Analisando o refletor para reflexão de um feixe paralelo, mostrado na figura 3.14, observa-se que são necessários somente 3 tipos de movimentos no espelho refletor superior, executados em 3 passos de ajustagem. Isto é necessário para que o refletor esteja ajustado, e possa desempenhar adequadamente suas funções. O primeiro passo consiste em um movimento de rotação do espelho para colocar o feixe num mesmo plano, figura 3.14b. O segundo passo

consiste em um movimento de inclinação do espelho para tornar o feixe de saída paralelo ao feixe de entrada, figura 3.14c. O terceiro passo consiste em um movimento que posiciona o espelho no eixo vertical para corrigir a altura requerida para o feixe de saída, figura 3.14d.

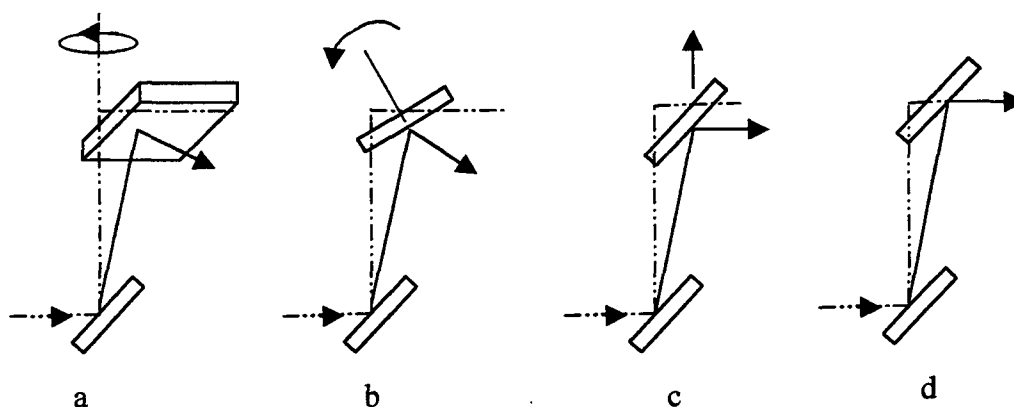


FIGURA 3.14. Sequência de ajustagem para espelhos, Hansen (1970).

Neste caso, foram feitas todas as correções no espelho superior. Dependendo da situação, poderia ser muito mais simples efetuar dois dos movimentos de ajustagem (giro e inclinação) no espelho superior e o terceiro movimento de ajustagem no espelho inferior. Esta escolha depende exclusivamente da praticidade de implementação destes ajustes, já que ambas as formas de ajuste resultam no cumprimento adequado da função do sistema, que é refletir um feixe paralelo num mesmo plano e em uma determinada altura.

A escolha de um mínimo necessário de tipos de movimentos pode ser facilitada através da resposta a algumas questões relacionadas a cada componente funcional. As questões mais importantes são:

1. Qual é o propósito do componente funcional?
2. Que movimentos são necessários para atingir esse propósito?
3. Que quantidades físicas e geométricas são relevantes para o cumprimento da sua função?
4. Quais são os efeitos de falhas comuns que influenciam a função do sistema?
5. A finalidade do componente funcional pode ser afetada por uma falha de posição, como um desvio com relação à posição nominal?
6. Quanto desvio das posições nominais é aceitável de modo que o componente funcional não seja afetado?
7. Que tolerâncias são funcionalmente permissíveis?
8. Que tolerâncias devem ser obtidas na fabricação?

9. É necessário algum ajuste devido às tolerâncias de fabricação serem maiores do que as tolerâncias permitidas?
10. Quão sensível deve ser o dispositivo de ajustagem, especialmente se as tolerâncias forem apertadas?

Através da resposta destas questões, a maior parte dos requisitos necessários para o projeto de ajustagem de um sistema será conhecida, facilitando o processo de projeto.

3.9. PREPARAÇÃO DAS INFORMAÇÕES PARA A AJUSTAGEM

A preparação das informações necessárias para ajustagem é importante para que se possa iniciar o projeto dos sistemas de ajustagem. Como exemplo de informações pode-se citar: qual a precisão desejada, o efeito dos erros sobre a precisão, qual o requisito de precisão dos componentes e da posição relativa entre os componentes, e outras informações necessárias, que podem ser usadas para definir por exemplo: os circuitos de ajustagem, construção do modelo matemático e simulação entre outras. Para isto três conjuntos de informações devem ser descritas de forma clara e exata, o diagrama de requisitos, sumário de erros e o diagrama de tolerâncias, que serão vistos a seguir:

1. Diagrama de requisitos:

Serve para relacionar os requisitos de precisão funcional aos movimentos funcionais. Se for considerado que um princípio de solução foi selecionado, os efeitos de cada um dos componentes individuais funcionais serão conhecidos, porém os efeitos combinados não. As posições relativas entre esses componentes serão conhecidas, mas o grau de precisão exigido nas posições nominais ainda é indeterminado. Para o perfeito funcionamento do sistema, os desvios permissíveis nas posições nominais devem ser coerentes entre todos os componentes. Muitas tolerâncias em dimensões importantes devem estar previamente definidas. Algumas tolerâncias adicionais podem ser facilmente obtidas a partir das especificações do projeto. A figura 3.15 mostra um diagrama de requisitos que representa claramente os movimentos funcionais e a exatidão necessária de um instrumento de medição.

Este instrumento é usado para medição do diâmetro interno de anéis, que são colocados sobre o prato (a1), que é dotado de esferas em sua parte inferior e estão apoiadas sobre a mesa (a), para permitir que o anel se mova na direção horizontal $\pm 5\text{mm}$, de forma que haja um perfeito contato entre o diâmetro interno do anel e o braço de medição móvel (b), e o

braço de medição articulado (c1). O braço de medição móvel (b), pode ser movido até 110mm para a esquerda de maneira que o instrumento possa medir anéis com diferentes diâmetros.

A mesa (a), pode ser movida até 48mm na direção vertical de maneira que possa medir anéis de diferentes espessuras, e para que o ponto de contato dos apalpadores tenham uma diferença de altura de no máximo 0,1 mm. No lado esquerdo, o anel é apoiado a um apalpador, que pode ser posicionado numa faixa de 110 mm. O braço de medição articulado (c1), é pivotado no mancal (c), e transfere sua posição ao pino de um micrômetro para fazer a leitura do diâmetro interno do anel. Para sistemas complexos, podem ser feitos diversos diagramas focados em sub-sistemas. Peças que não interessam à ajustagem podem ser omitidas nestes diagramas para tornar sua leitura mais objetiva.

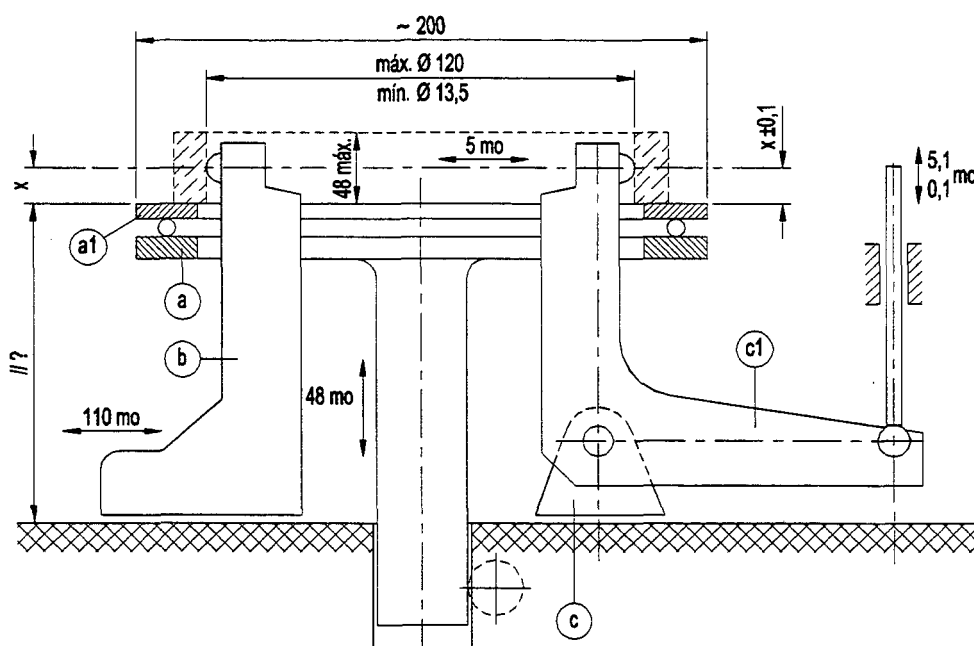

















FIGURA 3.15. Diagrama de requisitos de um instrumento de medição, Hansen, (1970).

2. Sumário de erros

É usado para apresentar as discussões referentes aos desvios (desvios dos valores nominais), relatando sua ocorrência e efeitos sobre o sistema. As tolerâncias agora devem ser consideradas para cada componente funcional, e também para componentes auxiliares que são importantes. Deve ser mostrado qual a influência dos desvios nos componentes individuais, e como podem ser evitados. Esta análise resulta na necessidade de um projeto cada vez mais detalhado. Assim, o projeto não pode ser completado até que alguns problemas tenham sido resolvidos, ou pelo menos seus princípios de solução tenham sido devidamente estabelecidos.

Nem todas as conclusões finais podem ter sido mostradas, os itens que ainda não estão claros são marcados com um ponto de interrogação. Para auxiliar a visualização o sumário de erros é apresentado na forma de uma tabela, que contém os erros e seus efeitos. O grande valor deste sumário de erros não é somente visualização, mas além disto, ele tende a garantir que cada desvio que pode influenciar no resultado seja levado em consideração. Outra preocupação diz respeito ao correto procedimento para cálculo e análise das informações constantes da tabela. Um exemplo da aplicação do sumário de erros pode ser visto na tabela 3.2, que está baseado no diagrama de requisitos do instrumento de medição mostrado na figura 3.15.

TABELA 3.2. Sumário de erros do instrumento de medição, Hansen, (1970).

Sumário de erros: instrumento de medição interna												
Componente Funcional	Movi-mento Funcional	Limites dos desvios com relação a:									Ajustagem com Se	Obs.
		Características		Posições nominais								
		Física	Geométrica	Translação			Rotação					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a	Medida da mesa com prato a1	 48 ad	-	-	-	-	-	40° (para 48 ad)	-		-	
a1	Prato	  5 ad		Superfície  eixo	-	-	-	-	-	 1,5°	-	
b	Braço de medição móvel	 110 ad		Altura do centro do contato de medição $\pm 0,1$	-	-	-	-	-	-	-	
c	Mancal do braço	-		Furo de mont. na base  ?  ?	Contatos de medição de b e c1 ser alinhados					-	  1°  ad	
c1	Braço de medição articulado	 5° ad		90° \pm ? Δ (comprim. do braço)?	-	0,8 μ m (5° ad)	-		-	BC  Base ± 4	Parafuso de ajustagem c2	

Dependendo do problema em questão, o sumário de erros pode ser feito através da diferenciação entre os grupos funcionais, componentes funcionais e dimensões funcionalmente significativas. Em alguns casos esta forma de representação torna-se mais objetiva, principalmente em sistemas mais simples como mostrada no exemplo do mecanismo da figura 3.16. Neste caso o sumário de erros é apresentado na tabela 3.3, com as dimensões funcionalmente significativas, isto é, aquelas que influem na precisão funcional do mecanismo.

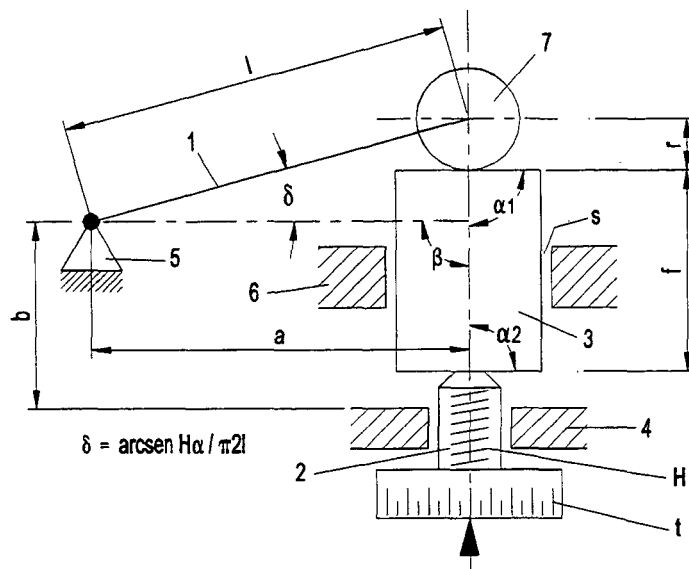


FIGURA 3.16. Dimensões funcionalmente significativas de uma barra de seno, Hansen (1970).

TABELA 3.3. Sumário das dimensões funcionalmente significativas do mecanismo da figura 3.16, adaptado de Hansen (1970).

Grupo funcional	Componente funcional	Dimensão significativa
Elementos	Alavanca (1)	Comprimento (l)
	Parafuso de medir (2)	Passo da rosca (H) Passo da escala (t)
	Carro guia (3)	Comprimento (f)
	Base (4)	Ver arranjo
Unões	Mancal (5)	Deslocamento radial V
	Alavanca/carro guia	Planicidade da superfície de contato Raio (r) da esfera (7)
	Parafuso de medir/carro	Planicidade da superfície de contato Raio (R) do parafuso (2)
	Guia (6)	Folga (s)
Arranjos	Alinhamento parafuso/carro	Ângulo $\alpha 1$
	Alinhamento sup. contato/direção do carro	Ângulo $\alpha 2$
	Posição do mancal	Distâncias a, b
	Orientação do mancal	Mancal \perp ao plano XY
	Alavanca na posição zero/direção da guia	Ângulo β

3. Diagrama de tolerâncias

É útil inserir as informações do sumário de erros no diagrama de requisitos. Assim, algumas informações do diagrama de requisitos serão alteradas, já que as informações contidas no sumário de erros são mais atuais e cobrem as falhas anteriormente deixadas no planejamento deste diagrama. O resultado é um esquema bem mais detalhado e compreensível. Entretanto, uma disposição completa do sistema agora é exigida, para garantir que todas as interfaces entre subsistemas estão devidamente analisadas.

Se forem adicionadas a este novo diagrama de requisitos informações obtidas durante as considerações sobre as tolerâncias, além de definições sobre a forma de componentes anteriormente incógnitos, este se tornará um diagrama de tolerâncias, que representa todas as considerações finais sobre as tolerâncias envolvidas no sistema.

O diagrama de tolerâncias é uma base para o projeto detalhado de todos os componentes do produto. Ele assume uma função dupla, contendo os requisitos para o projeto detalhado e fabricação, assim como, fornecendo meios de verificação das montagens individuais e para a ajustagem.

Dependendo da extensão do projeto, pode-se colocar todas as informações dos diagramas em um único desenho, ou separá-las em desenhos distintos. Para o exemplo mostrado na figura 3.15, foi gerado o diagrama de tolerâncias mostrado na figura 3.17.

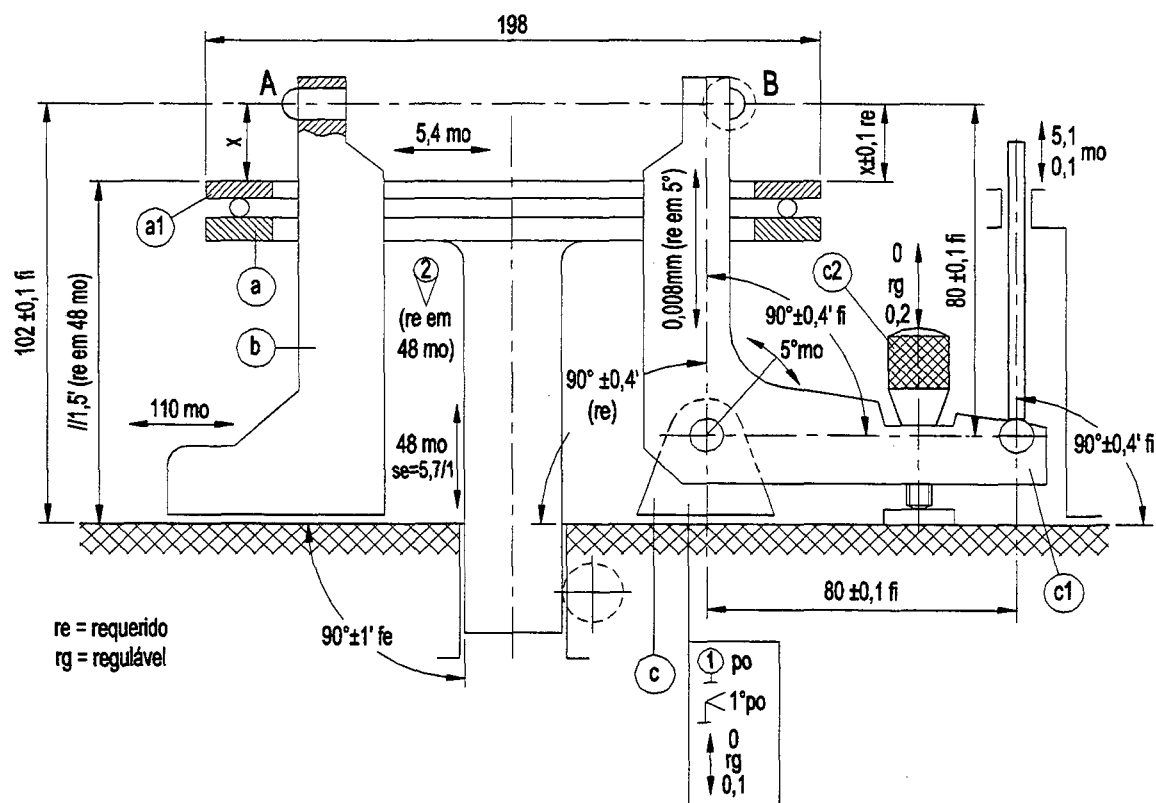


FIGURA 3.17. Diagrama de tolerâncias de um instrumento de medição, Hansen (1970).

Dependendo do caso as informações necessárias para a ajustagem podem ser organizadas na forma de uma lista, e que pode ser auxiliada por desenhos como o do diagrama de tolerâncias.

A seqüência de ajustagem e suas particularidades estão relacionadas umas com as outras no produto, assim esta seqüência não pode ser alterada sem prejuízo dos resultados, isto também não permite que o ajustador altere a seqüência de ajustagem por sua própria iniciativa. A seqüência de ajustagem poderia obedecer certos princípios, por exemplo, em um instrumento ótico a seqüência poderia obedecer a trajetória da luz, em outros produtos poderia ser feita de acordo com a seqüência de montagem.

TABELA 3.5. Exemplo de um plano de ajustagem do dispositivo da figura 3.18, Hansen (1970).

Número operação	Unidade ou meio de ajustagem	Procedimentos de ajustagem e explicações
1	<i>b1</i>	Indexar o pino excêntrico <i>b2</i> na posição zero, perpendicular ao eixo <i>b</i>
2	<i>c</i>	Posicionar a alavanca <i>c</i> perpendicular ao eixo da base <i>a</i> (tolerância $\pm 1^\circ$)
3	<i>B, A</i>	Instalar o espelho <i>B</i> na carcaça <i>b1</i> , e posicionar o autocolimador <i>A</i> na base de ajustagem de forma que a imagem refletida esteja perto do eixo horizontal.
4	<i>c, C1</i>	Rotacionar a alavanca <i>c</i> até parar no limitador <i>C1</i> ler o valor da posição horizontal no autocolimador com desvio $\leq 0,5^\circ$.
5	<i>c, C2</i>	Rotacionar a alavanca <i>c</i> até parar no limitador <i>C1</i> ler o valor da posição horizontal no autocolimador com desvio $\leq 0,5^\circ$.
6		Calcular a diferença ψ das duas leituras e determinar o ângulo apropriado de rotação ϕ do excêntrico conforme os seguintes dados: ψ : 0,5' 1' 2' 5' 10' 19'45" ϕ : 1°27' 2°55' 5°47' 14°37' 30°24' 90°
7	<i>b2</i>	Rotacionar o excêntrico <i>b2</i> no ângulo ϕ
8	<i>c</i>	Como verificação, repetir operações 4 e 5, a mudança de inclinação da imagem refletida não deve exceder a $\pm 2'$. Resultado: o mecanismo está alinhado com a base de ajustagem.
9	<i>c</i>	Posicionar a alavanca <i>c</i> perpendicular ao eixo da base <i>a</i>
10	<i>a1</i>	Rotacionar o pino excêntrico até a imagem refletida no autocolimador ser $+\delta$ do eixo vertical
11	<i>A, B, C</i>	Remover todos os meios de ajustagem. Resultado: a superfície <i>b1</i> da carcaça está alinhada e paralela ao plano da base de ajustagem com precisão de $\pm 2'$.

É importante que as informações na prescrição de ajustagem, a respeito de cada operação de ajustagem, sejam apresentadas em uma seqüência que pode ser a seguinte:

- Designação da unidade de ajustagem;
- Dados de montagem;
- Movimentos de ajustagem;
- Objetivo da operação de ajustagem;
- Verificação da operação para estabelecer o resultado, apresentando os meios de verificação;
- Tolerâncias a serem asseguradas;
- Assegurar os resultados, por exemplo, se um ajuste foi feito por um parafuso, pode-se usar uma contra-porca para evitar que o parafuso possa girar, e que se perca o ajuste realizado.
- Finalizar a ajustagem.

Pelo que foi exposto nas informações da prescrição de ajustagem, observa-se que as operações de ajustagem e verificação estão combinadas, porém estas operações podem ocorrer de forma separada. Quando as operações de verificação ocorrem de forma separada a descrição pode ser como a seguir:

- Tipo de verificação, fornecendo os meios de verificação;
- Propósito da verificação;
- Dados de tolerância;
- Medidas para serem adotadas se a verificação mostrar que os resultados são insatisfatórios.

3.11. PROCEDIMENTOS NECESSÁRIOS PARA REALIZAÇÃO DA AJUSTAGEM

Para que a ajustagem possa ser realizada de forma objetiva é importante que se siga as medidas estruturadas no fluxograma da figura 3.19, as quais são baseadas nas informações apresentadas nos tópicos anteriores. Além disto em alguns sistemas de ajustagem mais complexos pode haver a necessidade de um modelamento matemático para que se possa observar o comportamento dos erros, e simular o processo de ajustagem, porém isto será mostrado nos próximos tópicos.

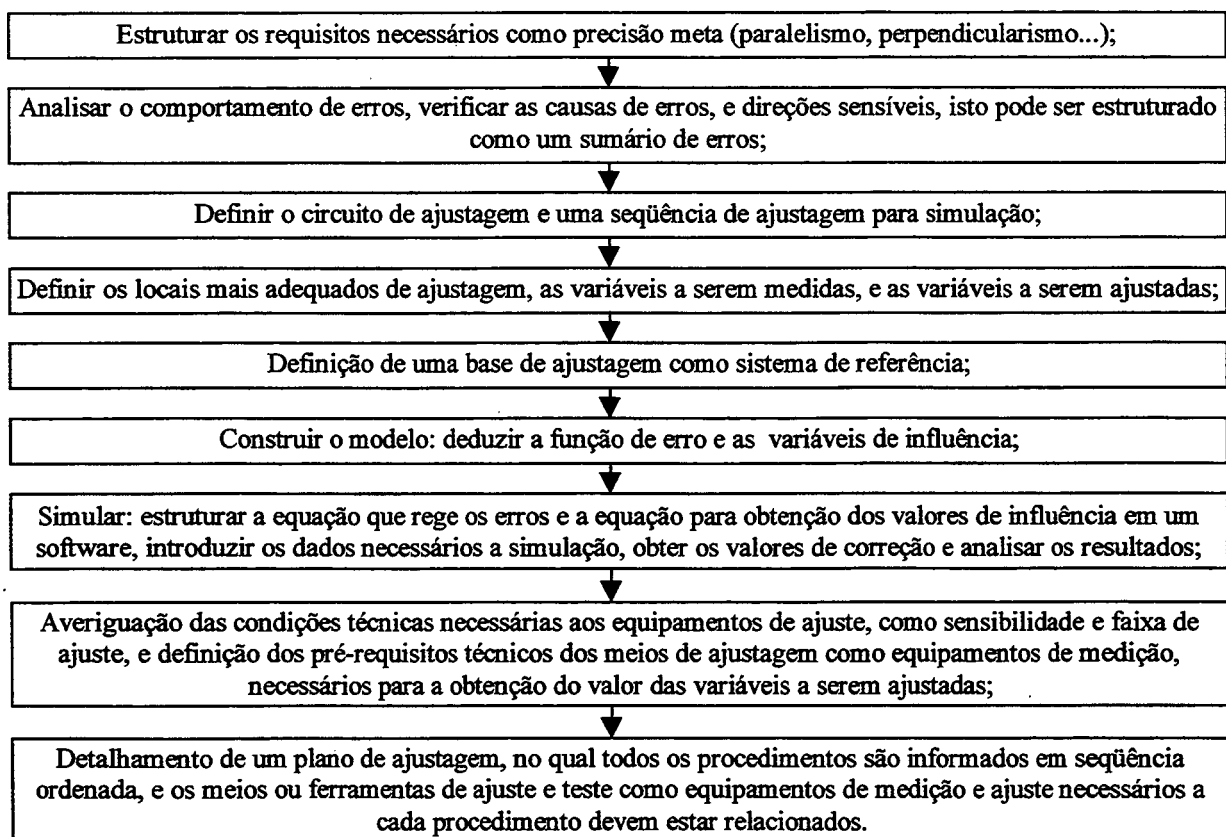


FIGURA 3.19. Fluxograma dos procedimentos necessários para a realização da ajustagem

3.12. SISTEMAS COMPUTACIONAIS DE APOIO A AJUSTAGEM

O desenvolvimento da informática tornou possível o auxílio às etapas do processo de projeto, bem como as tarefas envolvidas e entre elas a ajustagem. Assim pode-se mencionar o sistema especialista descrito por Gouvêa (1999), que se propõem a auxiliar o processo de seleção de sistemas de ajustagem. O programa ILJUR (1995), desenvolvido na TUI, auxilia a obtenção de valores de correção e a simulação do processo de ajustagem. Pode-se destacar ainda os programas paramétricos e genéricos de CAD que estão disponíveis no mercado, que podem auxiliar na ajustagem, podendo ser customizados através de uma linguagem de programação, e/ou trocar informações com uma planilha de cálculo. Isto torna estes programas capazes de executarem tarefas específicas para otimizar o processo de ajustagem. A seguir serão vistos em maiores detalhes estes programas.

3.12.1. FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO NA SELEÇÃO DE SISTEMAS DE AJUSTAGEM

Para a otimização da seleção de sistemas de ajustagem, Gouvêa (1999), apresenta uma ferramenta computacional que está sendo implementada no Institut für Maschinenelement und Konstruktion da Universidade Técnica de Ilmenau. Esta ferramenta computacional começa a ser usada após o reconhecimento, localização e quantificação dos erros, e deve oferecer uma ou mais alternativas de sistemas de ajustagem e auxiliar no processo de seleção da alternativa mais adequada ao problema, entre as alternativas possíveis. Para isto o programa faz uso de um banco de dados preparado especialmente para este propósito. As alternativas para a redução de erros são registradas de forma matemática, para que o programa possa fazer a seleção com o uso de funções de correlação.

A busca e seleção de uma solução apropriada pode ser representada por dois vetores: um das características qualitativas $[x_1, x_2, \dots, x_n]$, que representam os vetores dos requisitos. O vetor dos requisitos é um vetor que representa os requisitos de projeto, ou seja, ele contém as características que são exigidas pela solução. O outro vetor $[y_1, y_2, \dots, y_n]$ representa os vetores de características disponíveis na solução. Os vetores são representados em forma binária, pelo par ordenado $\{x_i, y_i\}$, com valores 0 ou 1. O número 1 indica que uma característica está presente, e o número 0 indica que a característica não está presente. Por exemplo: supondo que a 5ª característica seja: “ser capaz de realizar movimento de rotação”. Se em x_5 o valor for 1, então “ser capaz de realizar movimento de rotação” é um requisito necessário à solução. Caso o valor

seja 0, então “ser capaz de realizar movimento de rotação” não é um requisito necessário à solução. O mesmo pode ser dito a respeito do vetor y . Portanto, se x_5 e y_5 forem iguais a 1, teremos o par (1,1), o qual é computado em a .

A soma dos produtos das respectivas características correspondentes $x_i \cdot y_i$ podem ser ordenadas segundo a tabela 3.6, onde: $a + b + c + d = n$ e a, b, c, d , são o número de (1,1), (1,0), (0,1), e (0,0), que são as posições dos valores na tabela. O valor de a é igual ao número de vezes em que $x_i = 1$ e $y_i = 1$, b é igual ao número de vezes em que $x_i = 1$ e $y_i = 0$, c é igual ao número de vezes em que $x_i = 0$ e $y_i = 1$, e finalmente, d é igual ao número de vezes em que $x_i = 0$ e $y_i = 0$.

- a = representa as características contidas na lista de exigências as quais a solução também possui;
- b = representa as características exigidas e que não foram preenchidas pela solução;
- c = representa as características não exigidas mas as quais a solução possui;
- d = representa as características não exigidas e não disponíveis.

Na tabela 3.6 \bar{x}_i é o complementar de x_i , isto é, quando $\bar{x}_i = 0$, $x_i = 1$, e vice versa; o mesmo pode ser dito em relação a \bar{y}_i que é o complementar de y_i .

TABELA 3.6. Tabela das características qualitativas das exigências e das características disponíveis na solução (Bayer, 1992; Goker, 1996; *apud* Gouvêa, 1999).

$y_i \backslash x_i$	1	0
1	$a = \sum_{i=1}^n (x_i y_i)$	$b = \sum_{i=1}^n (x_i \bar{y}_i)$
0	$c = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i y_i)$	$d = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \bar{y}_i)$

TABELA 3.7. Ampliação da tabela 3.6 (Goker, 1996; *apud* Gouvêa, 1999).

Características		Solução técnica		
		Disponível		Não Disponível
		Características Disponível	Não Disponível	
Exigências	Requeridas	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>b</i>
	Não Requeridas	<i>C</i>	<i>D</i>	
	Não Requeridas	<i>c</i>		<i>d</i>

Os valores na tabela 3.6 ainda não permitem uma determinação de semelhança das soluções, pois identificam apenas semelhanças qualitativas. Para contornar isto, faz-se o uso de tabelas que representam detalhadamente as semelhanças de maneira que as mesmas possam ser quantificadas por cálculos. Com o auxílio da tabela 3.7 registram-se também concordâncias quantitativas. Onde *A* identifica as características, que estão de acordo com o vetor das exigências no vetor da solução. De forma análoga isto vale para *B* e *C*, porém *d* e *D* representam propriedades irrelevantes para os objetivos do projeto. Assim as soluções que apresentem um valor maior em *A* apresentam maior probabilidade de serem selecionadas.

3.12.2. PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE AJUSTAGEM (ILJUR)

O programa para simulação do processo de ajustagem chamado ILJUR (1995), foi desenvolvido na TUI, e tem os seguintes objetivos:

- Otimizar o processo de ajustagem na fase de projeto;
- Localização das grandezas que têm maior influência nas variáveis de saída;
- Obtenção de valores de correção para as grandezas de influências;
- Teste e avaliação da estratégia de ajustagem.

Para um melhor entendimento do funcionamento do programa será feito uso de um exemplo ilustrativo, onde serão mostradas a sequência de uso e o funcionamento do programa:

a) Definição do problema: desenvolver um mecanismo para posicionamento preciso do carro C em diferentes posições na direção *S*.

- b) **Seleção do princípio de solução para o posicionamento:** entre os vários princípios de solução, opta-se por um mecanismo de 4 barras que pode ser visto na figura 3.20.

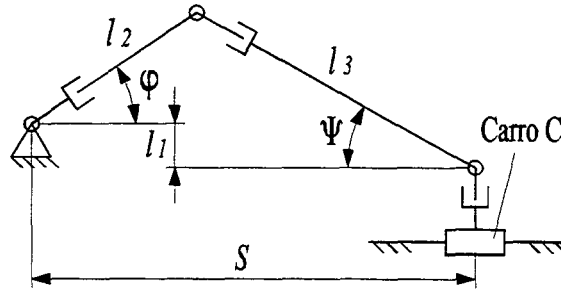


FIGURA 3.20. Mecanismo de 4 barras.

Como os comprimentos das barras têm limitada precisão, assim a função desejada que é o posicionamento na dimensão S possuirá um erro $\Delta S = f(\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta \varphi)$, que deve ser corrigido por ajustagem, onde $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$ são os erros nas barras, e $\Delta \varphi$ é o erro do ângulo de acionamento.

- c) **Determinação da equação de erro:** Para que possa ser obtida precisão funcional em S , é necessário achar os valores de correção para as dimensões l_1, l_2 e l_3 , de forma que estas dimensões possam ser ajustadas. Assim a equação de erro (3.3) é obtida derivado-se as equações (3.4) e (3.5) que descrevem o mecanismo. Com a ajuda desta equação um modelo matemático para o problema da ajustagem pode ser obtido.

$$S = l_2 \cdot \cos \varphi + l_3 \cdot \cos \Psi \quad (3.3)$$

$$0 = l_2 \cdot \sin \varphi - l_3 \cdot \sin \Psi + l_1 \quad (3.4)$$

$$\Delta S = \sin(\Psi) / \cos(\Psi) \cdot \Delta l_1 + \cos(\varphi + \Psi) / \cos(\Psi) \cdot \Delta l_2 + 1 / \cos(\Psi) \cdot \Delta l_3 \quad (3.5)$$

- d) **Obtenção da matriz de influência:** Em função de haver três erros $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$ nas barras, são necessárias três equações independentes para três diferentes ângulos de acionamento $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$; e que a dimensão S seja função destes ângulos, para possibilitar o cálculo dos erros funcionais $\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3$, apresentados na figura 3.21

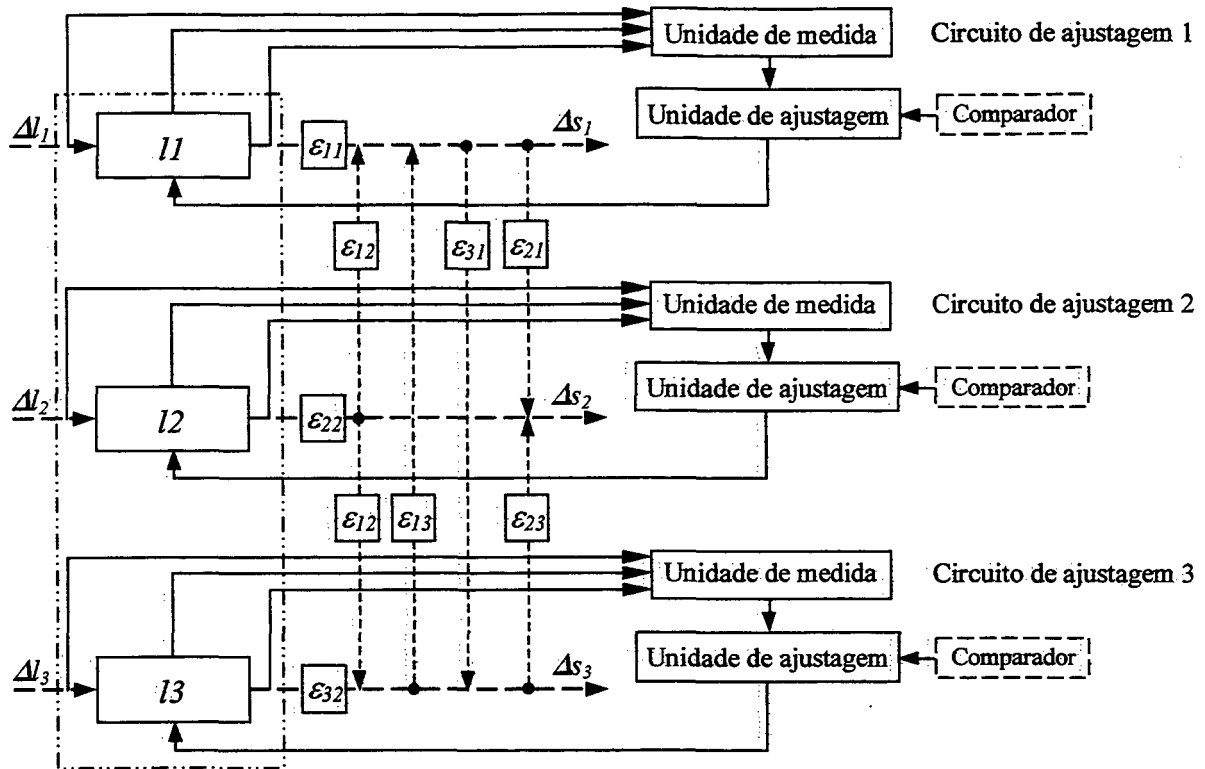


FIGURA 3.21. Circuito de ajustagem acoplado do mecanismo de 4 barras, adaptado de Höhne (1999)

A figura mostra claramente que trata-se de uma ajustagem em circuito acoplado, pois os valores de $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$ influenciam mutuamente os valores de $\Delta s_1, \Delta s_2, \Delta s_3$. Portanto para a otimização do processo de ajustagem faz-se necessário o uso de um algoritmo computacional de ajustagem. Caso contrário o processo de ajustagem se tornaria um processo de tentativa e erro.

O efeito dos erros $\Delta l_1, \Delta l_2$ e Δl_3 nas barras contribui para cada um dos erros funcionais $\Delta s_1, \Delta s_2, \Delta s_3$, e que podem ser descritos com a equação de erro linear $\Delta s_i = \epsilon_{ij} \cdot \Delta l_j$, análoga à equação (3.5), onde os valores de influência são calculados pelas equações 3.6, 3.7 e 3.8.

$$\epsilon(\Delta l_1) = \text{sen}(\Psi)/\cos(\Psi) \quad (3.6)$$

$$\epsilon(\Delta l_2) = \cos(\varphi + \Psi)/\cos(\Psi) \quad (3.7)$$

$$\epsilon(\Delta l_3) = 1/\cos(\Psi) \quad (3.8)$$

Neste caso existem três valores de influência ϵ_{ij} para cada um dos três ângulos de acionamento φ_i , disto resultam três equações lineares, (3.9), e que podem ser escritas na forma matricial, mostradas na equação (3.10).

$$\Delta S_i = \varepsilon_{ij} \cdot \Delta l_j$$

$$\Delta S_1 = \varepsilon_{11}(\varphi_1) \cdot \Delta l_2 + \varepsilon_{12}(\varphi_1) \cdot \Delta l_3 + \varepsilon_{13}(\varphi_1) \cdot \Delta l_1$$

$$\Delta S_2 = \varepsilon_{21}(\varphi_2) \cdot \Delta l_2 + \varepsilon_{22}(\varphi_2) \cdot \Delta l_3 + \varepsilon_{23}(\varphi_2) \cdot \Delta l_1 \quad (3.9)$$

$$\Delta S_3 = \varepsilon_{31}(\varphi_3) \cdot \Delta l_2 + \varepsilon_{32}(\varphi_3) \cdot \Delta l_3 + \varepsilon_{33}(\varphi_3) \cdot \Delta l_1$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta S_1 \\ \Delta S_2 \\ \Delta S_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \\ \Delta l_1 \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

e) **Entrada de dados no programa:** quando o modelo matemático do problema estiver completo, deve-se introduzir os dados mostrados na tabela 3.8, na tela de entrada do programa, figura 3.22, desvios das grandezas, erros iniciais, metas de precisão, e os valores da matriz de influência. Os dados das dimensões das barras e dos ângulos de acionamento são usados somente para o cálculo dos valores da matriz de influência. Os valores de Ψ podem ser obtidos das equações (3.3) e (3.4).

TABELA 3.8. Dados de entrada para o programa ILJUR.

Dados de entrada do sistema a ser ajustado				
Dimensões das barras (mm)	Desvios das grandezas (mm)	Ângulos de acionamento	Erros iniciais(mm)	Meta de precisão (mm)
$l_1 = 30$	$\Delta l_1 = 0,5$	$\varphi_1 = -10^\circ$	$\Delta S(\varphi_1) = 1$	$\Delta S(\varphi_1) = \pm 0,2$
$l_2 = 100$	$\Delta l_2 = 0,5$	$\varphi_2 = 10^\circ$	$\Delta S(\varphi_2) = 1$	$\Delta S(\varphi_2) = \pm 0,2$
$l_3 = 80$	$\Delta l_3 = 0,5$	$\varphi_3 = 25^\circ$	$\Delta S(\varphi_3) = 1$	$\Delta S(\varphi_3) = \pm 0,2$

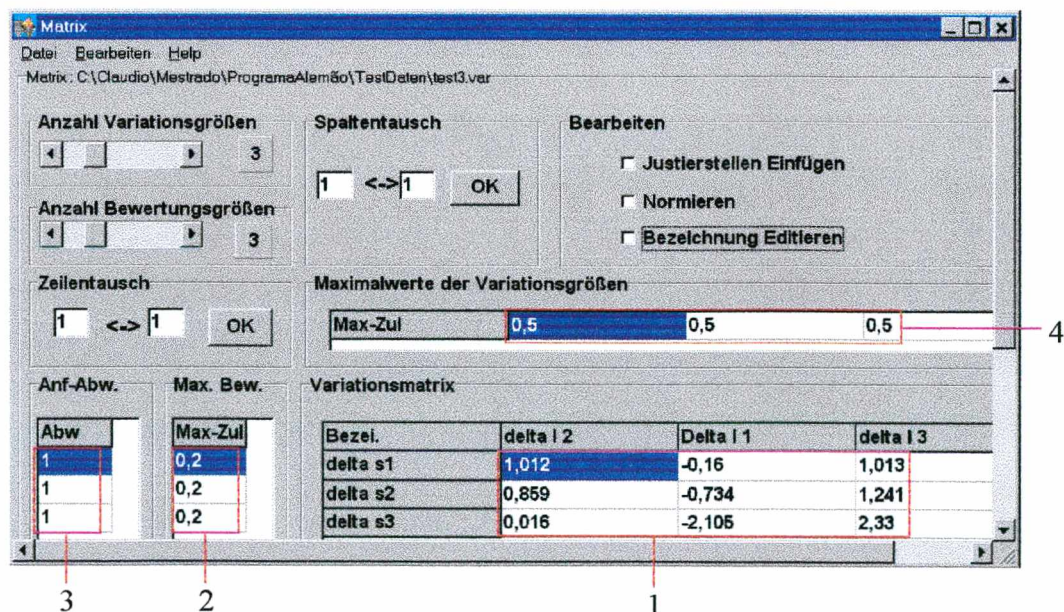


FIGURA 3.22. Tela de entrada de dados do programa ILJUR, 1) Matriz de influência, 2) precisão meta, 3) desvios iniciais, 4) desvios das grandezas.

f) **Simulação da ajustagem:** para a obtenção dos valores de correção é necessário primeiro escolher uma sequência de ajustagem, isto é feito na matriz de influência da tela de entrada, onde seleciona-se três valores de delta l_1 , l_2 e l_3 que se deseja como sequência de ajustagem, figura 3.22. A seguir iniciam-se as simulações para obtenção dos valores de correção para as dimensões das barras l_1 , l_2 , e l_3 . Estes valores são obtidos pelo programa ILJUR, sucessivamente através de várias interações feitas pelo algoritmo de convergência do programa. Estas interações terminam quando os valores de correção fazem com que os valores de precisão funcional da dimensão S converjam para os valores meta de incerteza, que neste caso é $S = \pm 0,2\text{mm}$ para as posições φ_1 , φ_2 e φ_3 . Isto é mostrado na figura 3.23.

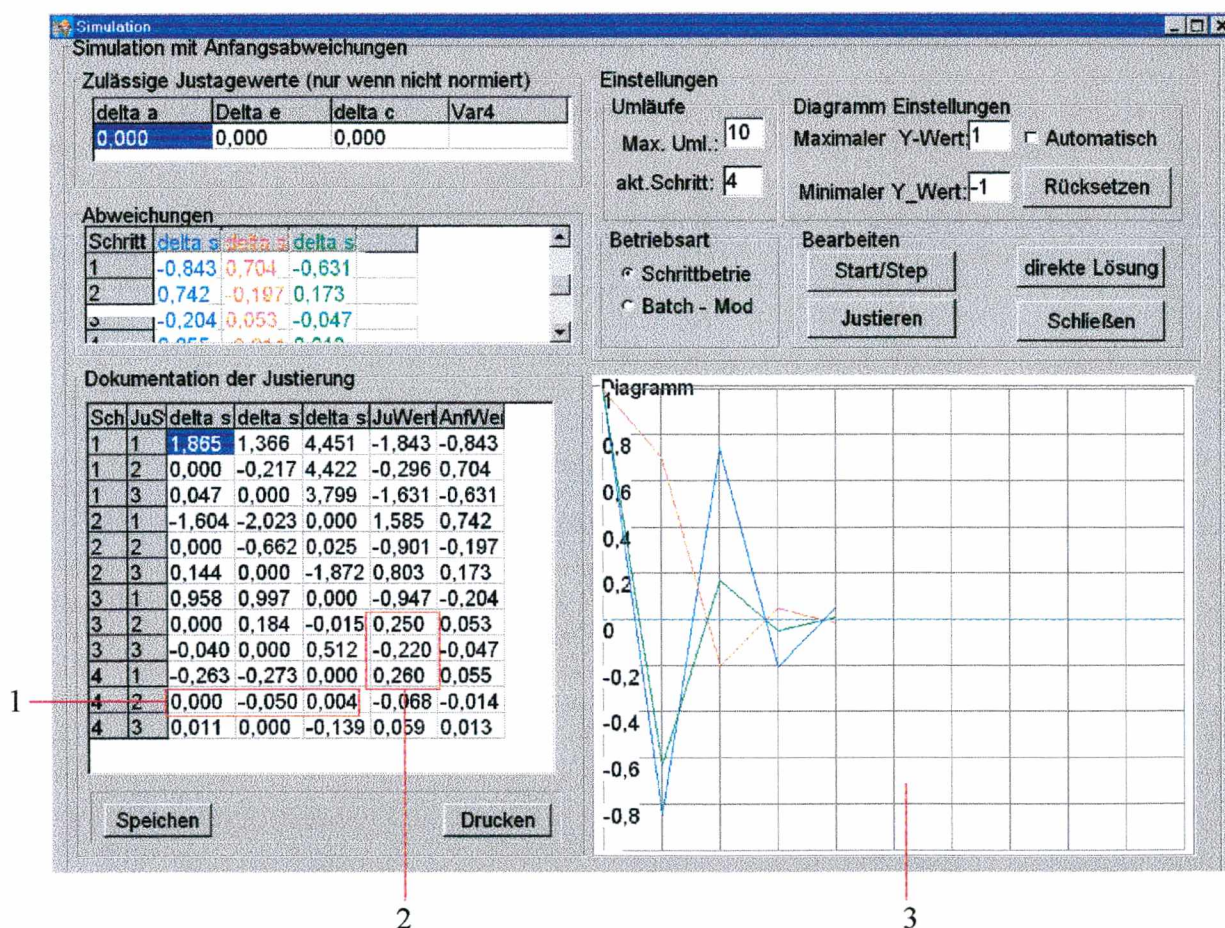


FIGURA 3.23. Tela de simulação do programa ILJUR, 1) valores de erro residual usando-se os valores de correção nas barras, 2) valores de correção das barras, 3) gráfico dos valores de erros residuais.

Neste caso a precisão funcional foi obtida na quarta interação para a sequência de ajustagem adotada. Segundo a figura 3.23 os valores de correção para $l_1 = 0,260\text{mm}$, $l_2 = 0,250\text{mm}$, e $l_3 = -0,220\text{mm}$. Com estes valores de correção os erros funcionais após a ajustagem

para as respectivas posições $\varphi_1 = -10^\circ$, $\varphi_2 = 10^\circ$ e $\varphi_3 = 25^\circ$ são respectivamente $\Delta S_1 = 0,000\text{mm}$, $\Delta S_2 = -0,050\text{mm}$ e $\Delta S_3 = 0,004\text{mm}$, portanto atendem a meta de precisão que é de $\pm 0,2\text{mm}$. Outras seqüências podem ser adotadas e simuladas, porém escolhe-se aquela onde possa-se obter a precisão funcional com o menor número de interações.

Através da simulação da ajustagem com o programa ILJUR é possível obter-se as seguintes informações:

- Prever quais posições do ângulo de acionamento φ_i acarretam uma parcela maior de erros ΔS_i ;
- Obter os valores de correção para as barras l_1 , l_2 , e l_3 , a serem ajustadas para as posições φ_1 , φ_2 , φ_3 ;
- Obtenção dos valores de erros funcionais, após a ajustagem ΔS_i ;
- Prever qual barra do mecanismo contribui com uma parcela maior de erros para cada ângulo de acionamento φ_i ;
- Possibilidade de visualizar todas as interações do processo de ajustagem, e escolher os valores de correção de menor precisão que faz com que o mecanismo alcance a meta de precisão nas posições φ_1 , φ_2 , φ_3 ;
- Definir uma seqüência de ajustagem, que apresente o menor número de interações até que se obtenha os valores de correção que satisfaçam a precisão meta.

3.12.3. SISTEMAS PARAMÉTRICOS

Com a atual tendência para o desenvolvimento de produtos de forma integrada, o uso de modeladores paramétricos desempenha um papel cada vez mais importante. Pois estes *softwares* além de poderem trabalhar de forma integrada a um banco de dados de desenvolvimento de produtos, podem ser usados desde as fases iniciais de desenvolvimento do produto, indo até o fim da fase de projeto detalhado. Estes programas podem modelar em 2D ou 3D, e fornecem uma grande quantidade de informações como simulação de movimentos, ajustagem, análise de interferências e colisões, verificação de cursos e dimensões máximas e mínimas, entre outras.

Análises numéricas e simulações podem ser facilmente realizadas, pois as dimensões a serem analisadas podem estar vinculadas a uma planilha eletrônica que contém o modelo matemático. Outra possibilidade é a capacidade de testar variantes dimensionalmente diferentes, bastando para isto, vincular as dimensões que se deseja alterar a uma planilha eletrônica onde podem ser inseridas n variantes. Para fazer um teste seleciona-se uma das variantes da planilha, o

modelo CAD assume suas dimensões, e as simulações podem ser feitas sem a necessidade de se redesenhar o modelo todas as vezes que uma nova variante é selecionada.

Uma vez definidas as especificações do produto e após terem sido selecionados os princípios de solução, estes podem ser modelados e dotados de cotas regidas por equações que descrevem o comportamento de erros do produto. Desta forma é possível obter-se os valores de correção, conhecer as partes que mais contribuem com erros e outras informações que dependem de como o modelo foi feito. O trabalho é facilitado, pois um modelo comum pode ser utilizado para análises, simulações, ajustagem e detalhamento, bastando para isto agregar as informações necessárias a execução de cada tarefa na respectiva etapa de projeto. A figura 3.24 mostra o mesmo mecanismo usado para descrever o funcionamento do programa ILJUR, porém modelado no *software* paramétrico SolidWorks.

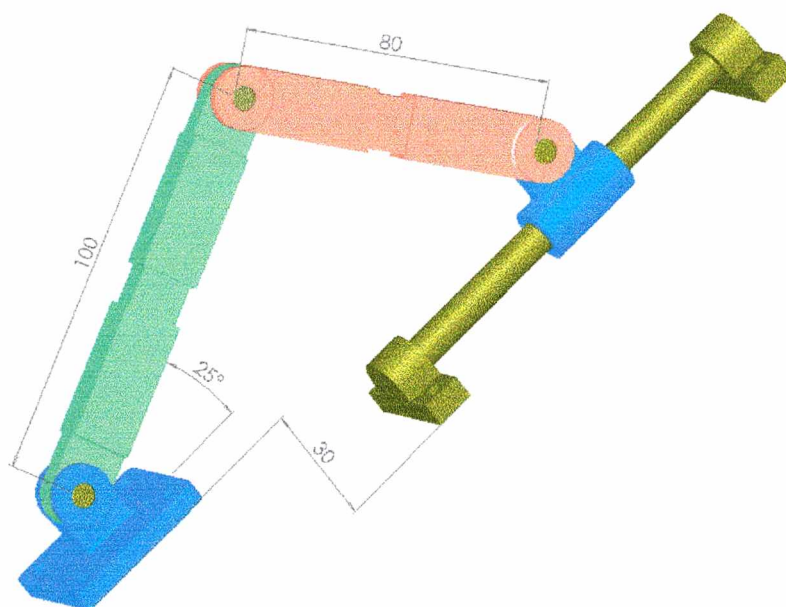


FIGURA 3.24. Modelagem de mecanismo de 4 barras.

3.12.4. PLANILHAS DE CÁLCULO

Este método de simular a ajustagem, e obter-se valores de tolerâncias para as dimensões que tem influência na precisão funcional do produto, foi desenvolvido no NeDIP, e faz uso de uma planilha eletrônica. Para a explicação deste método será feito o uso do mecanismo de 4 barras mostrado na figura 3.20, que é o mesmo usado para explicar o funcionamento do programa ILJUR, o objetivo disto é facilitar a comparação entre os métodos.

As etapas de definição do problema, seleção do princípio de solução para o posicionamento, determinação da equação de erro (serão usadas as mesmas equações 3.3, 3.4, 3.5), além do que, o circuito de ajustagem figura 3.21 é o mesmo usado para explicar o programa ILJUR, que ajustará o mecanismo somente para 3 posições de ângulo de acionamento φ que são: -10° , 10° e 25° . No método que foi desenvolvido busca-se atingir a meta de precisão $\Delta S_{meta} = \pm 0,2$ mm para o intervalo de -10° a 25° , em incrementos de 1° , porém pode-se fazer em incrementos maiores ou menores, dependendo do grau de refinamento que se deseja. Para a realização da simulação deve ser observados os seguintes passos:

- Atribuir os comprimentos das barras l_1 , l_2 , l_3 e o intervalo do ângulo de acionamento φ neste caso -10° a 25° ;
- O ângulo Ψ é calculado pela equação 3.4;
- Os valores das variáveis de influência $\varepsilon(\Delta l_1)$, $\varepsilon(\Delta l_2)$ e $\varepsilon(\Delta l_3)$ são calculados respectivamente pelas equações 3.6, 3.7 e 3.8, para cada ângulo φ de acionamento;
- Selecionar as 3 maiores variáveis de influência de um mesmo ângulo φ que são denominadas de: $\varepsilon(\Delta l_1)_{max}$, $\varepsilon(\Delta l_2)_{max}$ e $\varepsilon(\Delta l_3)_{max}$;
- Calcular a parcela de erro $P\Delta$ pela equação 3.11

$$P\Delta = \frac{\Delta S_{meta}}{v_i} \quad (3.11)$$

Onde: v_i = número de variáveis de influência, neste caso 3;

- Calcular a tolerância necessária em cada barra de forma que se possa obter $\Delta S_{meta} = \pm 0,2$ mm, isto é feito pelas equações 3.12, 3.13 e 3.14.

$$Tol.\Delta l_1 = \frac{P\Delta}{\varepsilon(\Delta l_1)_{max}} \quad (3.12)$$

$$Tol.\Delta l_2 = \frac{P\Delta}{\varepsilon(\Delta l_2)_{max}} \quad (3.13)$$

$$Tol.\Delta l_3 = \frac{P\Delta}{\varepsilon(\Delta l_3)_{max}} \quad (3.14)$$

- Calcular o valor de ΔS_T , isto é, o valor de erro funcional com as barras acrescidas de suas tolerâncias para cada um dos ângulos φ através da equação (3.15)

$$\Delta S_{Ti} = Tol.\Delta l_1 * \varepsilon(\Delta l_{i1}) + Tol.\Delta l_2 * \varepsilon(\Delta l_{i2}) + Tol.\Delta l_3 * \varepsilon(\Delta l_{ij}) \quad (3.15)$$

Observando-se os valores de ΔS_T na tabela mostrada no anexo 1, nota-se que são valores mais precisos que ΔS_{meta} , isto significa que as tolerâncias podem ser afrouxadas, e isto é

feito através de um fator de correção F_c , calculado pela equação (3.16), que multiplica cada um dos valores de tolerância das barras $Tol.\Delta l_1$, $Tol.\Delta l_2$ e $Tol.\Delta l_3$, desta forma obtêm-se os valores finais das tolerâncias que são respectivamente $Tol_F\Delta l_1$, $Tol_F\Delta l_2$ e $Tol_F\Delta l_3$.

$$F_c = \frac{\Delta S_{meta}}{\Delta S_{Tmax}} \quad (3.16)$$

Onde: ΔS_{Tmax} é o maior valor ΔS_T observado na planilha;

O valor de erro residual ΔS_F para cada um dos ângulos φ é calculado de maneira análoga a equação (3.15), porém agora são multiplicadas as variáveis de influência pelos valores finais das tolerâncias de cada barra, conforme equação (3.17).

$$\Delta S_{Fi} = Tol_F\Delta l_1 * \varepsilon(\Delta l_{i1}) + Tol_F\Delta l_2 * \varepsilon(\Delta l_{i2}) + Tol_F\Delta l_i * \varepsilon(\Delta l_{ij}) \quad (3.17)$$

Pela simulação mostrada na tabela do anexo 1 pode-se observar que:

A figura 3.25 apresenta um gráfico com o valor de erro residual ΔS_F (precisão funcional do mecanismo de quatro barras), e o valor de erro ΔS_{l1} , ΔS_{l2} e ΔS_{l3} de cada uma das barras para cada ângulo de acionamento φ , usando-se os valores de tolerância $Tol_{Fl1} = \pm 0,047$ mm, $Tol_{Fl2} = \pm 0,097$ mm e $Tol_{Fl3} = \pm 0,043$ mm, dentro dos quais, as barras devem ser ajustadas. Além disto é possível visualizar os valores e o comportamento de erro residual ΔS_F e os erros das barras ΔS_{Fi} no intervalo do ângulo φ simulado. O valor de erro de cada barra é calculado pela multiplicação do valor da tolerância final da barra por seu valor de influência para cada ângulo φ . Também é possível observar que os valores de tolerância calculados para as barras são tais, que no caso mais crítico que é o ângulo $\varphi = 25^\circ$ a precisão funcional ΔS_F está no limite da precisão meta, o objetivo disto é procurar fazer com que as barras sejam ajustadas com a maior tolerância possível, de maneira que ainda atendam a precisão meta, e que se possa otimizar a ajustagem e reduzir os custos.

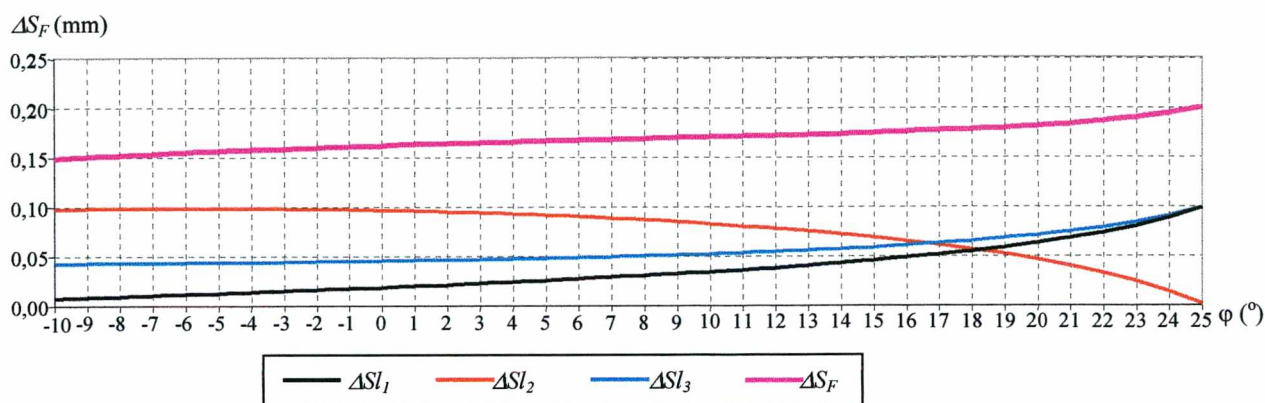


FIGURA 3.25. Valores de erro residual para cada ângulo de acionamento do mecanismo de quatro barras .

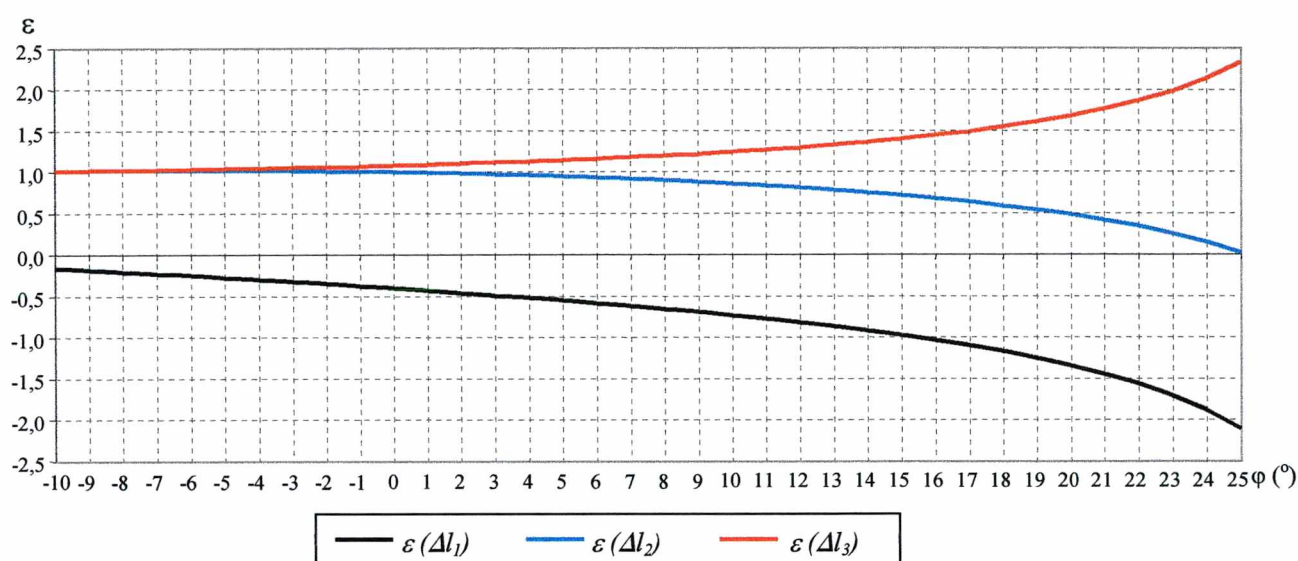


FIGURA 3.26. Valores de influência ε das barras.

Através dos valores de influência é possível saber qual barra contribui com maior parcela de erro para cada um dos ângulos φ , quando $\varphi = 25^\circ$ a barra que mais influência ΔS_F , é a barra l_3 , pois tem o maior valor de influência $\varepsilon(\Delta l_3) = 2,331$, e a barra l_2 neste caso é que menos contribui com o erro funcional, pois tem o menor valor de influência $\varepsilon(\Delta l_2) = 0,017$. Quando o ângulo $\varphi = -5^\circ$ é a barra l_1 que mais contribui com o erro funcional, e as barras l_2 e l_3 contribuem com a mesma parcela de erros na precisão funcional. Com isto é possível saber qual barra deve ter uma tolerância mais estreita, e quais barras podem ter as tolerâncias mais folgadas, de maneira que se possa reduzir os custos de fabricação. A figura 3.26 apresenta um gráfico com os valores de influência para cada barra no intervalo do ângulo de acionamento simulado, assim é possível se visualizar qual barra tem maior influência em cada ângulo de acionamento.

O anexo 1, mostra a implementação do método usando a planilha eletrônica, e como resultados tem-se as tolerâncias das barras que são $\Delta l_1 = \pm 0,047$, $\Delta l_2 = \pm 0,097$ e $\Delta l_3 = \pm 0,043$. Os gráficos mostrados nas figuras 3.25 e 3.26 são feitos com os valores da tabela do anexo 1.

A seguir será mostrado na tabela 3.9 um comparativo entre o método desenvolvido e o programa ILJUR.

TABELA 3.9. Comparativo entre o método desenvolvido e o programa ILJUR.

Característica	Método usando planilha	Programa ILJUR
Tipo de simulação	Apresenta um único valor de tolerância para cada barra. Isto torna o processo de ajustagem rápido e objetivo.	Apresenta uma seqüência de valores nominais de correção, e que devem ser usados na mesma seqüência no processo de ajustagem, assim o processo de ajustagem se torna menos objetivo e mais demorado.
Tipo de resultado	Apresenta valores de tolerância específicos para cada uma das barras, o que em termos de projeto é uma informação desejável, pois os valores podem ser usados diretamente na documentação do projeto, e no processo de ajustagem.	Apresenta valores nominais para a correção, o que na prática é muito difícil de se obter, pois sempre haverá tolerâncias nas dimensões. Dependendo do caso, um desvio ou tolerância nos valores de correção podem inviabilizar a ajustagem
Abrangência da simulação	Pode ser simulada uma trajetória com n posições onde deseja-se a precisão, e com incremento das posições de acordo com as necessidades.	Somente podem ser simulados um número de posições que depende do número de variáveis de influência, neste caso 3.
Integração com outros <i>softwares</i>	Possível com bancos de dados de projeto, sistemas CAD e CAE, de maneira que se possa realizar visualizações, e outras análises	Não é possível, a menos que se altere o programa.
Tipo de <i>software</i> usado	Pode ser implementado em qualquer tipo de planilha eletrônica, e que são de fácil aquisição no mercado	Programa específico e proprietário, de difícil aquisição no mercado
Possibilidade de ampliar o número de funções	É possível incluir facilmente novas funções de simulação, bastando para isto implementar novas equações à planilha. Pode ser utilizado para avaliar o comportamento de erro de um produto. Diversos tipos de gráficos podem ser gerados automaticamente	É necessário ter o código fonte, e conhecer a linguagem de programação. Gera automaticamente apenas os gráficos dos valores de correção.
Parametrização	Totalmente paramétrico, uma mudança em um parâmetro como as dimensões das barras e os números de influência entre outras informações são automaticamente recalculados	Não paramétrico, é necessário recalcular manualmente os valores de influência.
Manipulação dos resultados	Pode-se fixar os valores de tolerância de uma das barras, e os valores das outras são automaticamente recalculados de forma a atender a precisão meta.	Não é possível
Gráficos e interpretação dos resultados	Os gráficos podem ser configurados com o tipo de informação e segundo o padrão desejado pelo usuário, a interpretação é clara e objetiva.	Gera apenas o gráfico dos valores de correção das barras, a interpretação dos resultados não é objetiva, e requer treinamento do usuário.
Automatização do processo de simulação	O grau de automatização pode ser implementado através do uso de recursos como macros presentes em qualquer planilha	O cálculo das variáveis de influência é manual, a simulação é automática.

3.12.5. BANCADA DE AJUSTAGEM

Segundo Nönnig et al., (1999) a procura por procedimentos de ajustagem como algoritmos, obtenção de valores de influencia, pontos de ajustagem, seqüências de ajustagem e em que quantia as grandezas devem ser alteradas para alcançar os parâmetros desejados é difícil. Além disto alguns parâmetros necessários só podem ser obtidos através de medições. A bancada de ajustagem pode ser empregada na fase de projeto preliminar para testar protótipos, validar modelos, além disto pode ser usada para auxilio na ajustagem de pequenos lotes de produtos. Porém para grandes lotes é necessário o uso de sistemas automatizados. Em vista disto foi construído uma bancada de ajustagem, para a verificação experimental e simulação do processo de ajustagem, no Instituto de Elementos de Máquinas e Projetos da TUI, que possibilita os seguintes recursos:

- Análise dos procedimentos de ajustagem;
- Modelagem e simulação do processo de ajustagem;
- Verificações experimentais de ajustagem;
- Desenvolvimento de softwares de ajustagem e controle para o uso automático em ajustagem.

3.12.6. SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE AJUSTAGEM

Quando é desenvolvido um produto com produção em série, Scheller e Eberhardt (1999), comentam que os procedimentos de ajustagem e posicionamento devem ser capazes de se adequar a processos de montagem automatizados, isto é, os princípios de solução dos sistemas de ajustagem e os procedimentos de ajustagem devem ser selecionados de forma que possam ser automatizados. Isto foi evidenciado por Springsguth (1999) através de um experimento com ajuste e colagem de lentes em uma linha de montagem automática. Através de mecanismos de posicionamento controlados por computador conseguiu-se ajustar rapidamente e com grande precisão lentes de diferentes formas e tamanhos. A figura 3.27 apresenta o esquema de um sistema para automatizar o processo de ajustagem.

Segundo Grasenack (1991), principalmente na montagem de ópticas de precisão a ajustagem possui grande influência sobre os tempos de montagem, e portanto sobre os custos. Assim, além de algoritmos de ajustagem adequados a automatização é muito importante para a diminuição dos tempos e custos.

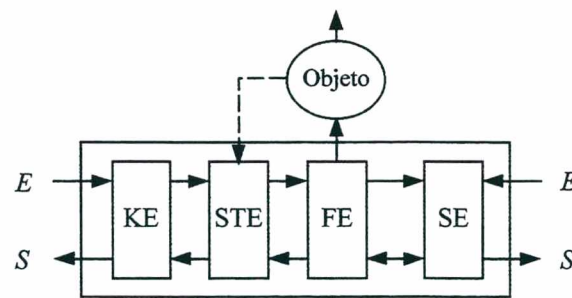


FIGURA 3.27 Esquema para automatizar o processo de ajustagem, Schorcht (1991).

Onde:

KE = Equipamento de comunicação para a realização do intercâmbio de informações entre o componente a ser automatizado e o meio, com o objetivo de monitorar, influir e acoplar o processo.

STE = Equipamento de controle cuja atuação conjunta realiza o procedimento de ajustagem e conduz o objeto a condição de medida nominal.

FE = Equipamento de ajustagem.

SE = Equipamento de segurança para proteção dos grupos construtivos e das perturbações do meio.

E = Entrada

S = Saída.

A seguir são apresentados por Schorcht (1991), algumas considerações a serem levadas em conta no desenvolvimento de um produto para que possa ter o processo de ajustagem automatizado.

- Desenvolvimento de sistemas automáticos de ajustagem deveria ser em paralelo ao desenvolvimento do produto;
- Na automatização da fabricação é necessária uma parcela de tempo para verificação dos procedimentos, com o objetivo de manter os riscos dentro de limites aceitáveis;
- A automatização deveria exigir a preparação de poucas máquinas especiais, isto deve ser considerado nos custos nas fases iniciais de projeto;
- Varias exigências funcionais sobre os sistemas automáticos derivam de numerosas interdependências, na fabricação tais exigências relacionam-se apenas indiretamente com a realização do procedimento como: armazenamento, transporte, etc.
- O tempo deve ser considerado como um fator crítico no desenvolvimento do produto, a solução da tarefa não é concluída com o projeto do sistema automático, mas sim com a aprovação funcional na fabricação;

- No projeto de sistemas automáticos de ajustagem, deriva-se a estrutura funcional das funções parciais que completam e são necessárias ao procedimento de ajustagem. Estas funções resultam da análise das operações de trabalho, as funções que completam o procedimento provem das condições que asseguram um processo otimizado.

3.13. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou os conhecimentos a respeito da ajustagem, como uma técnica que têm o objetivo de melhorar a precisão funcional dos produtos, e que só recentemente começou a ser sistematizada como uma técnica da mecânica de precisão.

Em função do que foi exposto neste capítulo, e dos assuntos pesquisados que são correlatos ao tema de obtenção da precisão funcional pode-se concluir que:

- Há a necessidade de uma metodologia bem definida e estruturada para o projeto de produtos de precisão que envolvam as técnicas para a melhoria da precisão funcional;
- O conhecimento a respeito de ajustagem encontra-se fragmentado em vários trabalhos de diversos autores, é preciso agregar estes conhecimentos de forma mais detalhada, e com os conceitos adequadamente definidos;
- Como a área de precisão é estratégica, assim sendo é de grande importância uma obra que reúna os conhecimentos de projeto para produtos de precisão, e principalmente envolvendo o tema da ajustagem que é recente;
- Em função das necessidades de simular o processo de ajustagem, testou-se o programa ILJUR, porém este mostrou-se inadequado às necessidades, em função do tipo de resultado que produz, e da impossibilidade de ser usado para a avaliação do comportamento de erros de um produto. Em função destas limitações decidiu-se pelo desenvolvimento de um método que suprisse estas deficiências, este método é implementado em uma planilha eletrônica.

O conhecimento a respeito de ajustagem visto neste capítulo servirá de base para o desenvolvimento da metodologia de projeto de produtos de precisão com ênfase em ajustagem que será visto no próximo capítulo, e para os estudos de caso.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS DE PRECISÃO COM ÊNFASE NO USO DE SISTEMAS DE AJUSTAGEM

Este capítulo apresenta uma metodologia que integra diferentes técnicas como melhoria do comportamento de erros, compensação e ajustagem, além de ferramentas para implementar a precisão funcional como algoritmos computacionais que podem ser usados pelo projetista ao longo do processo de projeto de produtos. Com isto, busca-se maximizar a relação custo-precisão, e tornar o desenvolvimento do projeto do produto mais rápido, organizado e sistematizado.

A metodologia apresentada tem o objetivo principal de melhorar a precisão funcional dos produtos novos e de produtos que estão passando por reprojeção ou atualizações. Através desta metodologia serão consideradas as possibilidades de redução de erros, por meio de princípios de solução adequados e/ou pouco sensíveis a erros, compensação e outras técnicas vistas no capítulo 2, além da ajustagem vista de forma mais detalhada no capítulo 3. Dependendo do nível de precisão necessário e da complexidade do produto, pode-se chegar a conclusão após análises, de que bastam modificações nos princípios de solução para se obter a precisão funcional desejada, portanto não sendo necessário o uso de outros meios como ajustagem. Em outros casos onde as exigências por precisão funcional são maiores, princípios de solução pouco sensíveis a erros, o uso de técnicas especiais de fabricação, e sistemas de compensação, não são suficientes para garantir a precisão funcional desejada, então faz-se uso dos sistemas de ajustagem.

A metodologia foi desenvolvida de forma a ser flexível, pois pode ser usada no desenvolvimento de produtos novos, reprojetos, ou atualizações em máquinas e produtos, principalmente de precisão. Além disto permite que se obtenha a precisão funcional através de

um meio, ou de uma combinação de meios como compensação e ajustagem, ao longo do desenvolvimento do produto de acordo com as necessidades de precisão.

Deve-se ter em mente que as soluções mais efetivas para a obtenção de produtos capazes de atender os requisitos de projeto como elevada precisão funcional ocorrem na fase do projeto conceitual do produto, através de uma adequada estruturação funcional e a seleção de adequados princípios de solução, tais como projeto invariante, arranjos com poucos erros. No entanto isto nem sempre é suficiente para atender aos requisitos de projeto como custo e precisão, assim sendo a metodologia apresenta também outras técnicas que podem ser utilizadas para obter-se a precisão funcional do produto.

A metodologia proposta apresenta-se na forma de um fluxo ordenado de atividades, que está dividido em quatro fases que são: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Cada uma destas fases é dividida em várias etapas, sendo que as mesmas são compostas de uma ou mais tarefas.

No desenvolvimento desta metodologia, será dada ênfase às informações pertinentes as tarefas para a melhoria da precisão funcional principalmente através da ajustagem. É importante mencionar que não serão detalhadas as tarefas contidas nas etapas das quatro fases da metodologia, que não estão relacionadas a melhoria da precisão funcional.

Um fato relevante é que procurou-se sempre que possível, apontar mais de uma ferramenta para a realização da mesma tarefa. Isto permite que a equipe de projeto tenha critérios e orientações de escolher a ferramenta e/ou técnica mais adequada ao desenvolvimento dos mais variados produtos, quer sejam dotados de sistemas de ajustagem ou não. Isto se deve ao fato que cada produto tem características específicas, e portanto diferentes ferramentas podem proporcionar bons resultados. Com isto busca-se tornar o uso da metodologia o mais abrangente, flexível, fácil e objetivo possível, independente do produto a ser desenvolvido, e dos recursos e ferramentas que a equipe de projeto tenha a disposição.

Além disto a equipe de projeto deve sempre trabalhar desde as fases iniciais do desenvolvimento do produto com abordagens que agregam valor, funcionalidade e qualidade ao produto como:

- **DFQ** (*Design for Quality*) Projeto para qualidade;
- **DFP** (*Design for Precision*) Projeto para precisão;
- **DFM** (*Design for Manufacturing*) Projeto para fabricação;

- **DFA** (*Design for Assembly*) Projeto para montagem;
- **DFD** (*Design for Disassembly*) Projeto para desmontagem;
- **MD** (*Modular Design*) Projeto de produto modular;
- **DFX** (*Design for X*). Onde o “X” significa um atributo qualquer de projeto que se deseja maximizar em função dos requisitos de projeto.

O fluxograma da figura 4.1 apresenta a metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase em sistemas de ajustagem.

4.1. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia será vista em mais detalhes com o objetivo de orientar a equipe de projeto a desenvolver o produto de uma forma mais organizada e metódica. Com isto espera-se que os produtos desenvolvidos tenham sua qualidade e principalmente a precisão funcional implementada. Além disto é importante destacar que a metodologia deverá possibilitar uma maior produtividade no projeto, isto é, um ciclo de projeto mais rápido, e uma maior garantia no atendimento aos requisitos de projeto.

Os sistemas de ajustagem começam a ser considerados na fase de projeto conceitual do produto quando for detectada a sua necessidade, e seu desenvolvimento ocorre de forma integrada, e simultânea às fases do desenvolvimento do restante do produto, como se fosse um módulo do produto, destinado a cumprir uma função específica que é implementar a precisão e/ou a habilidade funcional do produto.

Para uma melhor explicação de cada fase, as mesmas terão duas abordagens, sendo a primeira quando trata-se de um novo projeto, e a segunda quando trata-se de reprojeção de um produto já existente.

A seguir serão descritas de forma mais detalhada cada fase da metodologia, as etapas e as tarefas, bem como as ferramentas e/ou técnicas empregadas, ilustradas por um fluxograma de informações específico para cada fase, composto das figuras 4.2 até 4.8.

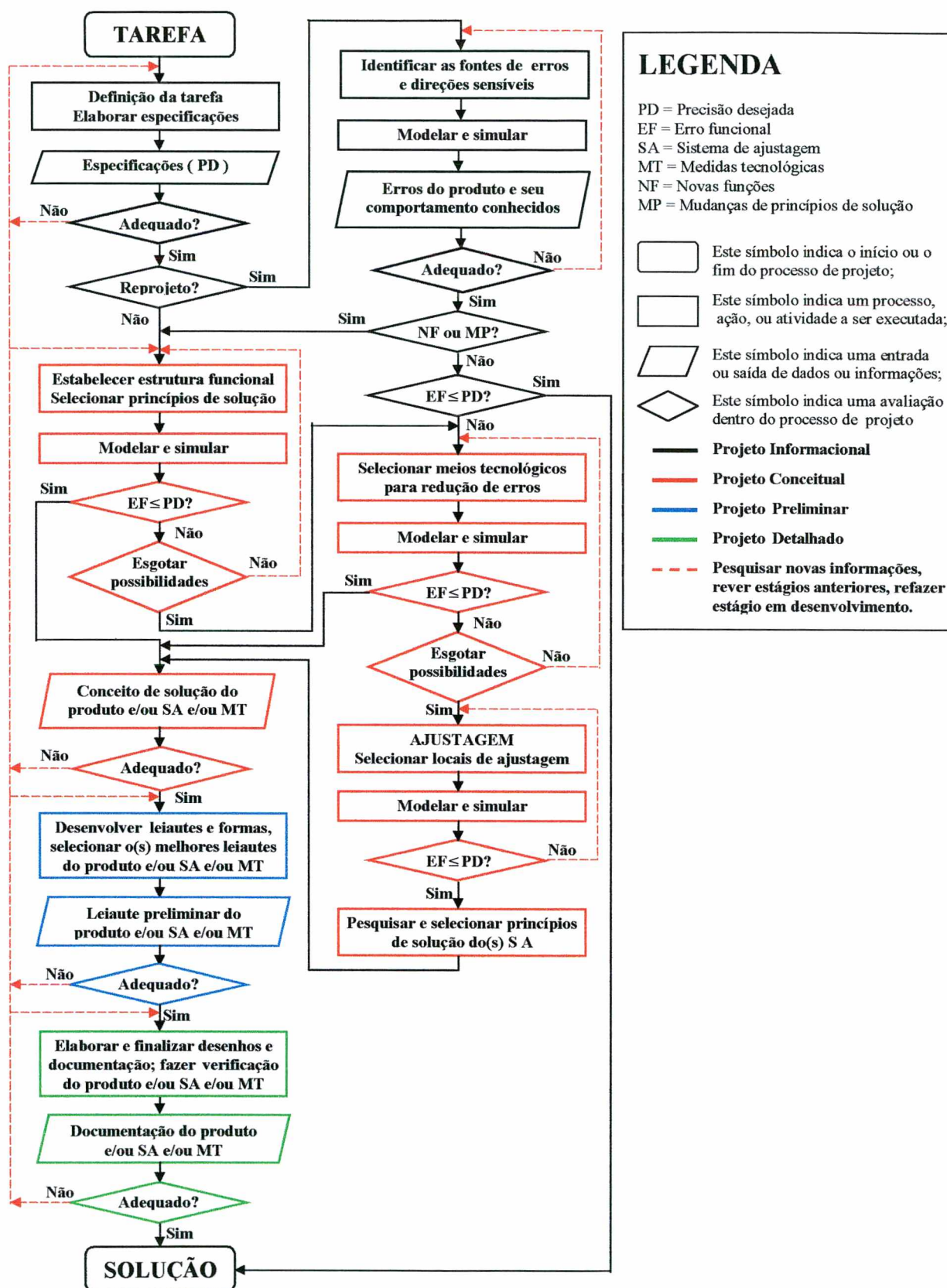


FIGURA 4.1. Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem.

4.1.1. FASE DE PROJETO INFORMACIONAL

A descrição desta fase encontra-se dividida em dois casos que são um projeto novo, e para um reprojeto. Isto se deve ao fato de que nesta fase são necessárias algumas etapas a mais quando trata-se de um reprojeto, isto pode ser identificado na figura 4.1. A seguir serão detalhados ambos os casos.

■ CASO 1: PROJETO NOVO

Nesta fase entra-se em contato com a tarefa, por parte de um cliente específico através de uma solicitação, ou uma necessidade detectada no mercado. Inicia-se fazendo um levantamento abrangente sobre as necessidades dos clientes, buscando-se saber qual a precisão funcional necessária para que o produto desempenhe suas funções adequadamente. Isto pode ser feito através de uma pesquisa de mercado, pesquisa em empresas, com formulários de questões específicas para cada cliente, que são descritas em maiores detalhes por Fonseca (1996).

Estes questionários servem como uma orientação geral, e devem ser adequados com questões específicas para o produto que se deseja desenvolver. Para que se possa ampliar as informações disponíveis é recomendável: fazer uma análise de produtos concorrentes, pesquisar tendências de mercado, novas tecnologias, novas técnicas, normas e outras informações específicas relativas ao projeto.

Também devem ser identificadas e listadas as necessidades dos clientes. As informações sobre as necessidades dos clientes devem ser então convertidas em requisitos técnicos de projeto, isto é, características técnicas de projeto mensuradas com uma unidade técnica, como: peso em kg, ciclo de vida, entre outras.

Se existem produtos concorrentes é importante saber como satisfazem as necessidades do cliente, e se não satisfazem, por qual motivo. Isto ajuda a orientar a equipe de projeto a desenvolver um produto no mínimo com qualidade igual ou superior ao da concorrência, aumentando suas chances de êxito, e evitando que erros de projeto sejam relançados.

Para hierarquizar os requisitos é usada a ferramenta QFD, onde os requisitos dos usuários serão os “O QUE” os clientes necessitam. Os requisitos técnicos são os “COMO” atender as necessidades do consumidor. A ferramenta QFD gera interações entre as necessidades e os requisitos técnicos. Desta interação é possível saber o valor da importância de cada

requisito, e portanto quais tem maior prioridade, para que o produto atenda as necessidades dos clientes da melhor maneira.

■ CASO 2: REPROJETO

Na reforma, o produto já existe fisicamente, porém deseja-se adequá-lo a novas exigências do ponto de vista da precisão funcional e/ou implementar novas funções. As etapas de definir as tarefas, e elaborar as especificações do reprojeto são as mesmas de um projeto novo, porém com as particularidades inerentes a um reprojeto, como levar em consideração o que deve ser substituído e/ou modificado, o que permanece inalterado e o que deve ser eliminado. Com as especificações da precisão desejada, deve-se executar uma avaliação detalhada do produto. Isto pode ser feito através de ensaios geométricos e/ou através de outros meios para definir quais estruturas e mecanismos podem permanecer no produto, quais devem ser substituídos, quantificar os erros e suas fontes, quais os componentes e/ou módulos que mais contribuem para os erros, as direções sensíveis e a integridade dos componentes. Isto se deve ao fato de que é necessário fazer um estudo da viabilidade do reprojeto.

Com informações a respeito da precisão funcional requerida pelo cliente, e com informações de erros funcionais e o estado atual dos componentes do produto é possível fazer uma verificação para ver se é viável um reprojeto do ponto de vista de precisão, custo e funcionalidade. Isto é importante pois os componentes e peças do produto podem estar de uma forma tal, que nem medidas tecnológicas e/ou sistemas de ajustagem podem fazer com que o produto atinja a precisão funcional requerida. Portanto não se deve avançar para as próximas fases do reprojeto investindo tempo e recursos se não há viabilidade. Outra situação possível é que o custo de um reprojeto muitas vezes pode não compensar os benefícios, sendo portanto mais adequado a compra de um produto novo.

Outra maneira de verificar se uma reforma é viável é por meio de uma simulação do comportamento de erro do produto, através do modelo matemático que rege seu comportamento de erro. Com as informações da precisão desejada, e dos erros que o produto apresenta, é possível através de simulação localizar os pontos que mais contribuem para o erro funcional, e quais os valores das parcelas de erros e da precisão funcional. Isto auxilia na tomada de decisões para a seleção de quais meios utilizar para a melhoria da precisão funcional.

Para um projeto novo tem-se como saída desta fase um conjunto de especificações técnicas, como precisão funcional, organizadas pelo grau de importância que representam para o

cliente. Caso seja um reprojeto pode-se saber se é viável ou não, além de se saber a magnitude e o comportamento dos erros funcionais do produto. Para maiores detalhes a respeito das etapas desta fase podem ser vistas nas figuras 4.2 e 4.3.

A seguir são listados alguns documentos e ferramentas de apoio que podem ser utilizadas nas fases de projeto da metodologia.

1. Ordem de serviço;
2. Ciclo de vida dos produtos;
3. Catálogo de informações técnicas;
4. Formulário de identificação de oportunidades;
5. Sistema de busca em base de dados de patentes, tecnologia, normas e fornecedores;
6. *Softwares* com funções específicas a determinadas tarefas;
7. Análise dos produtos concorrentes *Benchmarking*;
8. Matriz da casa da qualidade;
9. Quadro ou lista de especificações do produto;
10. Síntese funcional do produto;
11. Metodologias e ferramentas de projeto como DFQ, DFM, DFA, MD, etc.;
12. Matriz de seleção das estruturas funcionais;
13. Sistemas CAD, CAE, CAM;
14. Matriz de seleção dos princípios de solução;
15. *Softwares* para simulação de ajustagem;
16. Modelagem matemática;
17. Cálculo matemático;
18. Técnicas de revisão de projetos;
19. Técnicas de medição;
20. Lista e/ou sumário de erros.

Além das ferramentas utilizadas nas etapas de projeto, a metodologia é apresentada de forma que um banco de dados integre as ferramentas utilizadas, com o objetivo de otimizar as trocas de informações, propiciar o uso de engenharia simultânea, reduzir a possibilidade de erros, e aumentar a produtividade dos projetos.

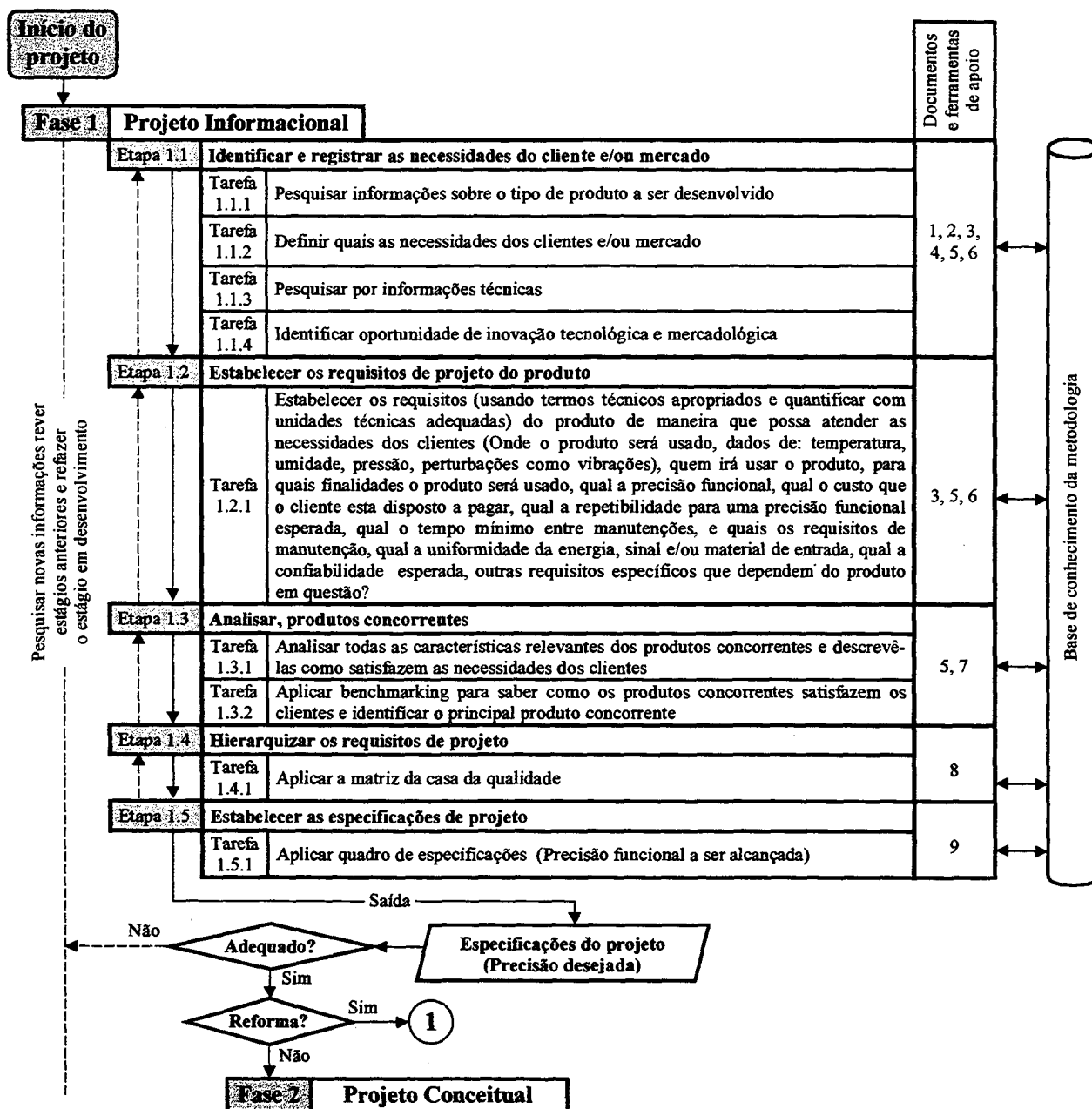


FIGURA 4.2. Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da fase 1: projeto informacional.

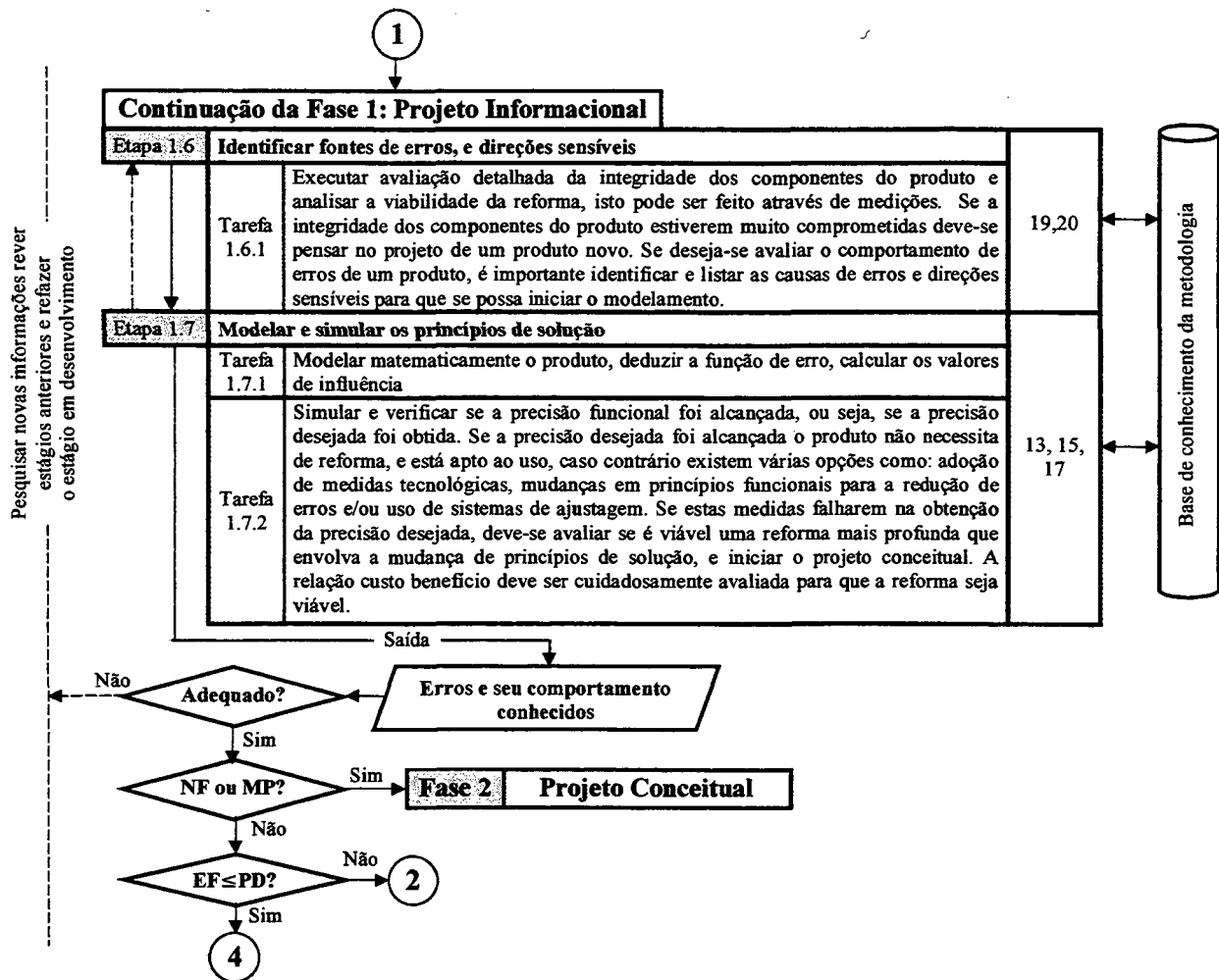


FIGURA 4.3. Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da continuação da fase 1: projeto informacional.

4.1.2. FASE DE PROJETO CONCEITUAL

Esta fase de projeto também está dividida em dois casos que são para um projeto novo, e para um reprojeto, porém esta divisão aqui é necessária, pois dependendo do produto, quer seja um reprojeto ou um novo projeto, podem não ser necessárias algumas etapas desta fase. Por exemplo, um reprojeto pode nesta fase necessitar somente de um sistema de ajustagem, mesmo tendo sido investigada a possibilidade do uso de medidas tecnológicas, assim sendo não são necessárias as etapas 2.1 a 2.6 mostradas na figura 4.4, já em um projeto novo estas etapas são necessárias. A seguir serão detalhados ambos os casos.

■ CASO 1: PROJETO NOVO

A fase de projeto conceitual é uma das fases mais importantes no desenvolvimento de produtos de precisão, principalmente em novos projetos, pois as medidas de maior efetividade como a seleção de uma adequada estrutura funcional e princípios de solução ocorrem nesta fase. Aqui podem ser definidas estruturas invariantes e/ou pouco sensíveis a erros, tendo como resultado produtos de elevada precisão funcional sem no entanto ser necessário o uso de outros meios como, compensação ou mesmo ajustagem para obter-se precisão.

Partindo-se do conjunto de especificações técnicas, organizadas pelo grau de importância, definidos na fase anterior, é preciso abstrair para reconhecer e elaborar a função global e sua estrutura. Para isto pode-se usar a **Estruturação Funcional**, que permite a determinação e visualização das subfunções do sistema a partir da função global, de forma que a análise de todas as suas partes permita um estudo mais adequado para a escolha do arranjo a ser implementado no produto.

A procura por funções parciais e da elaboração da estrutura ótima de funções passa a ser um dos passos mais importantes da fase de concepção. Considerando que nesta fase não há detalhes construtivos, deve-se levar em conta aspectos como: projeto modular, princípios de solução pouco sensíveis a erros, com o objetivo de se obter um produto de qualidade e elevada precisão funcional.

Uma vez que a função global e as funções parciais alternativas estejam desenvolvidas, é necessário então selecionar as estruturas de funções que melhor se adaptem aos requisitos de projeto. A seleção deve priorizar a relação custo/precisão/funcionalidade, além de possuir características de invariância e pouca sensibilidade a erros.

Com a estrutura funcional selecionada, é necessário agora desenvolver os princípios de solução. Para isto existem vários métodos tais como *brainstorming*, métodos intuitivos, catálogos e outros. Estes princípios de solução devem ser potencialmente capazes de satisfazer os requisitos de projeto. Segundo Back e Forcellini (1997), a seleção destes princípios de solução pode ser feita através de ferramentas como as matrizes de seleção de Pugh, entre outras. A seleção deve priorizar a relação custo/precisão/funcionalidade, além de possuir características de invariância e pouca sensibilidade a erros.

Deve-se destacar que para projetos de produtos novos é importante o estabelecimento de estruturas de funções parciais alternativas. Isto se deve ao fato de que nas etapas seguintes, quando forem escolhidos os princípios de solução para uma dada estrutura de função, esta pode não apresentar resultados adequados de precisão funcional. Assim é útil ter-se a possibilidade por exemplo, de simular os mesmos princípios de solução, porém com uma estrutura funcional diferente, de forma que se possa gerar resultados adequados de precisão funcional. Outra opção é a simulação da mesma estrutura funcional, porém com princípios de solução diferentes.

Quando a estrutura de função e os princípios de solução e os parâmetros básicos do produto já estiverem definidos pode-se fazer uma simulação para verificar se a configuração adotada conseguirá atingir a precisão desejada. Isto pode ser feito através de programas específicos para este fim ou *softwares* paramétricos que podem ser customizados para necessidades específicas do produto a ser desenvolvido. Caso a precisão desejada seja atingida então pode-se passar para a próxima fase que é a de projeto preliminar, do contrário pode-se adotar outra estrutura funcional e/ou princípios de solução, e simular para ver se é possível obter a precisão desejada. Estas operações podem ser repetidas até que se esgotem todas as possibilidades e opções em termos de estruturas funcionais e princípios de solução.

Caso a precisão desejada ainda não tenha sido alcançada, então deve-se procurar usar outros meios para obtenção de precisão funcional como medidas tecnológicas, e que vem a ser: compensação de erros, técnicas de controle, sistemas de fabricação especiais e otimização das tolerâncias. Deve-se então selecionar diferentes meios e/ou combinações que podem ser simulados até que se consiga obter a precisão funcional, e então passa-se para a nova fase que é a de projeto preliminar. Caso contrário deve-se adotar sistemas de ajustagem.

Nesta fase é necessário identificar os tipos de erros que devem ser ajustados, desenvolver um circuito de ajustagem, achar os locais mais adequados para localizar tais sistemas, verificar a quantidade, as direções e tipos de movimentos necessários. Após isto, deve-se construir o modelo matemático para a simulação; se a precisão desejada for obtida, parte-se então para o desenvolvimento dos princípios de solução do sistema de ajustagem. Se o produto dotado do sistema de ajustagem se mostrar adequado do ponto de vista da precisão, funcionalidade e custo, então passa-se para a próxima fase que é o projeto preliminar. Caso não for possível atingir a precisão desejada deve-se simular outras opções de ajustagem tais como: alterar os locais de ajustagem, mudar o tipo de movimento e/ou a seqüência de ajustagem até que se obtenha a precisão desejada.

■ CASO 2: REPROJETO

A fase de projeto conceitual da metodologia para o reprojeto de um produto, é também análoga a mesma fase da metodologia usada para um projeto novo. Aqui tem-se um produto com componentes que já estão definidos, e que podem permanecer no produto, serem reformados ou mesmo substituídos, isto dependerá de sua integridade, do seu grau de contribuição aos erros funcionais, e/ou da necessidade de se alterar e/ou implementar uma nova função ao produto.

O estabelecimento das estruturas funcionais, em muitos casos pode não ser necessário, pois as funções do produto já estão todas definidas. Em casos onde o reprojeto é mais abrangente, principalmente quando se deseja incorporar novas funções ao produto, a estruturação funcional pode ser necessária.

A seleção do princípio de solução mais adequado, se dá entre as funções e princípios de solução já existentes, e aqueles que deverão ser alterados, substituídos e/ou incorporados ao produto. Os aspectos do tipo qualitativos e de custos na seleção dos princípios de solução associados aos já existentes no produto, podem ser feitos por matrizes de decisão como a de Pugh. Porém do ponto de vista da precisão funcional é necessário modelar e simular os princípios de solução. Caso a precisão desejada tenha sido atingida pode-se avançar para a próxima fase. Caso contrário, deve-se testar outras combinações de princípios de solução até que se esgotem todas as opções de combinação. Se ainda não for possível obter a precisão desejada, deve-se seguir às próximas etapas de forma análoga a um projeto novo, isto é, devem ser testadas a possibilidade de se usar meios tecnológicos, e/ou sistemas de ajustagem.

Nesta fase tem-se como informações, a estrutura funcional e os princípios de solução do produto e quando necessário dos meios tecnológicos e/ou sistema de ajustagem já selecionados. Para maiores detalhes a respeito das etapas desta fase ver as figuras 4.4, 4.5 e 4.6.

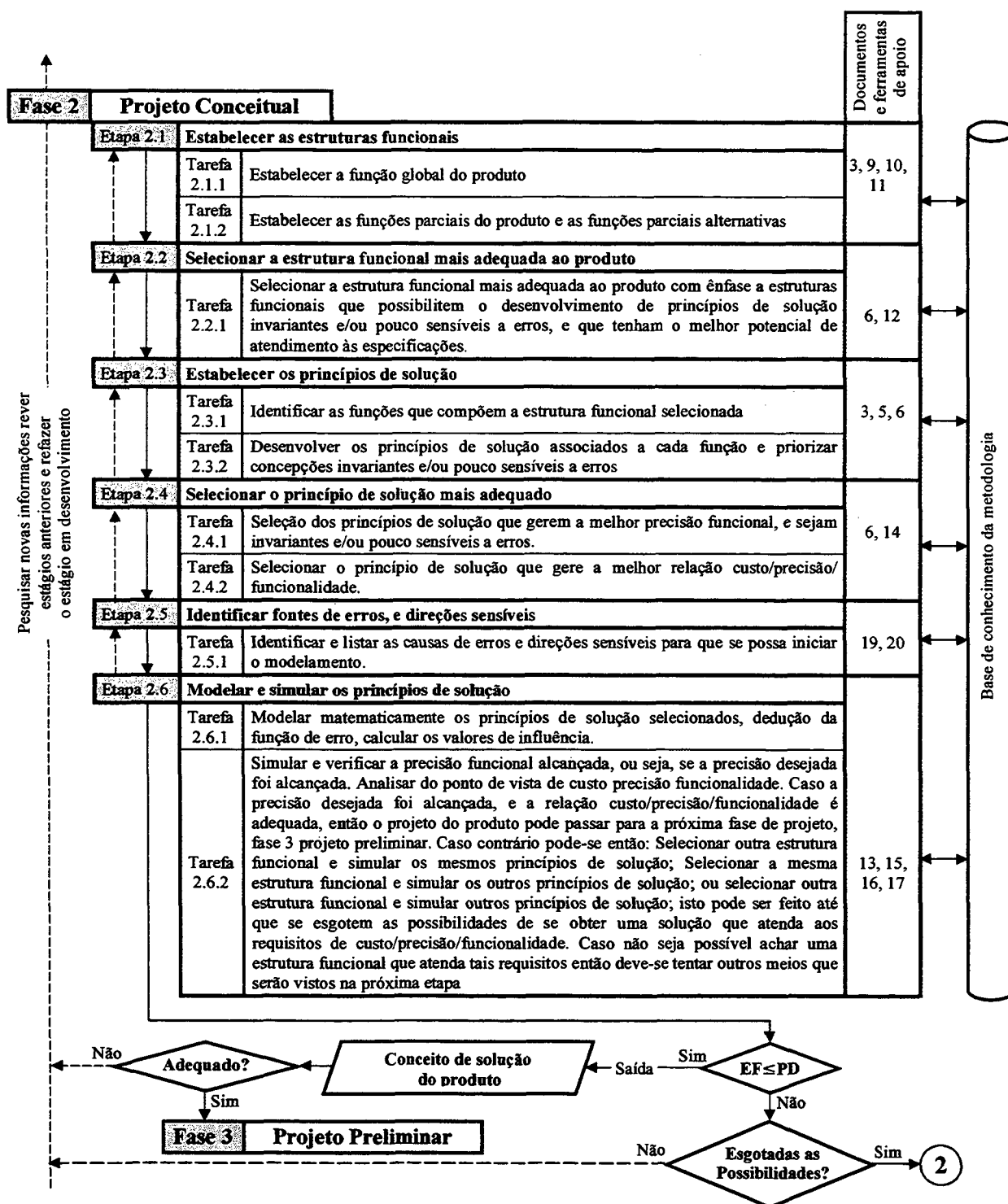


FIGURA 4.4. Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da fase 2: projeto conceitual.

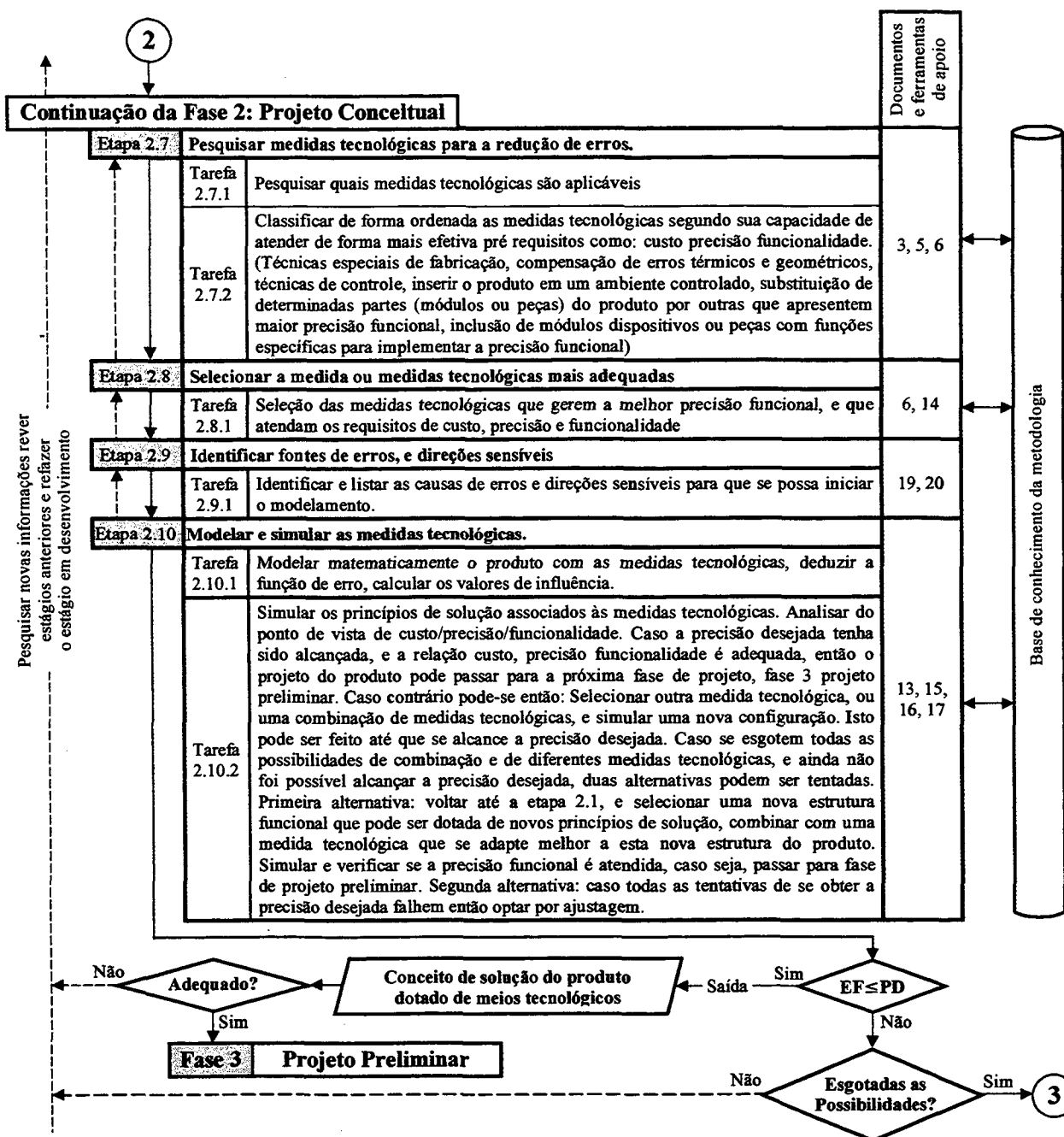


FIGURA 4.5. Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da continuação da fase 2: projeto conceitual.

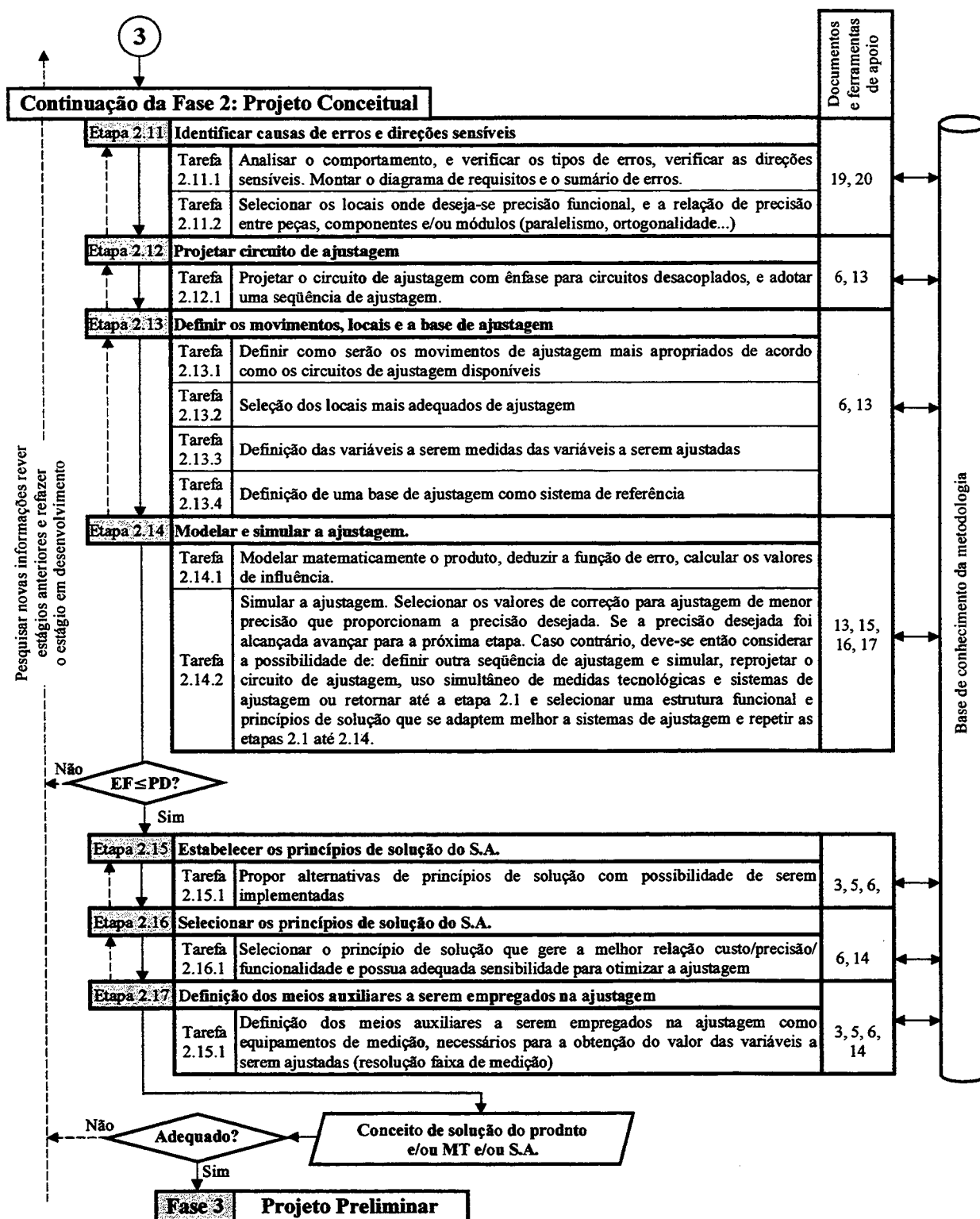


FIGURA 4.6. Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da continuação da fase 2: projeto conceitual.

4.1.3. FASE DE PROJETO PRELIMINAR

Nesta fase tanto para um projeto novo, quanto para um reprojeção tem-se as mesmas atividades, o que difere é a possibilidade de haver sistemas de ajustagem e/ou medidas tecnológicas, ou o produto ser desprovido de meios de obtenção de precisão funcional.

O produto e/ou medidas tecnológicas, e/ou sistemas de ajustagem já encontram-se definidos com os princípios de solução selecionados e as peças e módulos com suas formas, dimensões e interfaces definidas. Os componentes são selecionados e dimensionados.

Durante o dimensionamento do sistema de ajustagem, também é necessário começar o desenvolvimento de forma simultânea e integrada de toda a infra-estrutura necessária a fabricação, montagem, testes e principalmente dos equipamentos, dispositivos, algoritmos e softwares necessários para otimizar a ajustagem.

Ainda nesta fase é importante uma simulação e/ou verificação dos mecanismos de ajustagem para averiguar sua eficiência no produto como um todo. Além disto o projeto completo do produto deve sofrer uma verificação minuciosa, para evitar erros, e se detectada a possibilidade, deve-se executar melhorias e otimizações.

Nesta fase tem-se como informações, o projeto totalmente definido, com as peças, componentes e módulos dimensionados e selecionados. O sistema de ajustagem e/ou medidas tecnológicas, quando necessários o seu uso, também tem sua posição definida, e estão dimensionados. A infra-estrutura necessária para a ajustagem e fabricação está definida. O projeto nesta fase está pronto para ser detalhado. Para maiores detalhes a respeito das etapas desta fase ver figura 4.7.

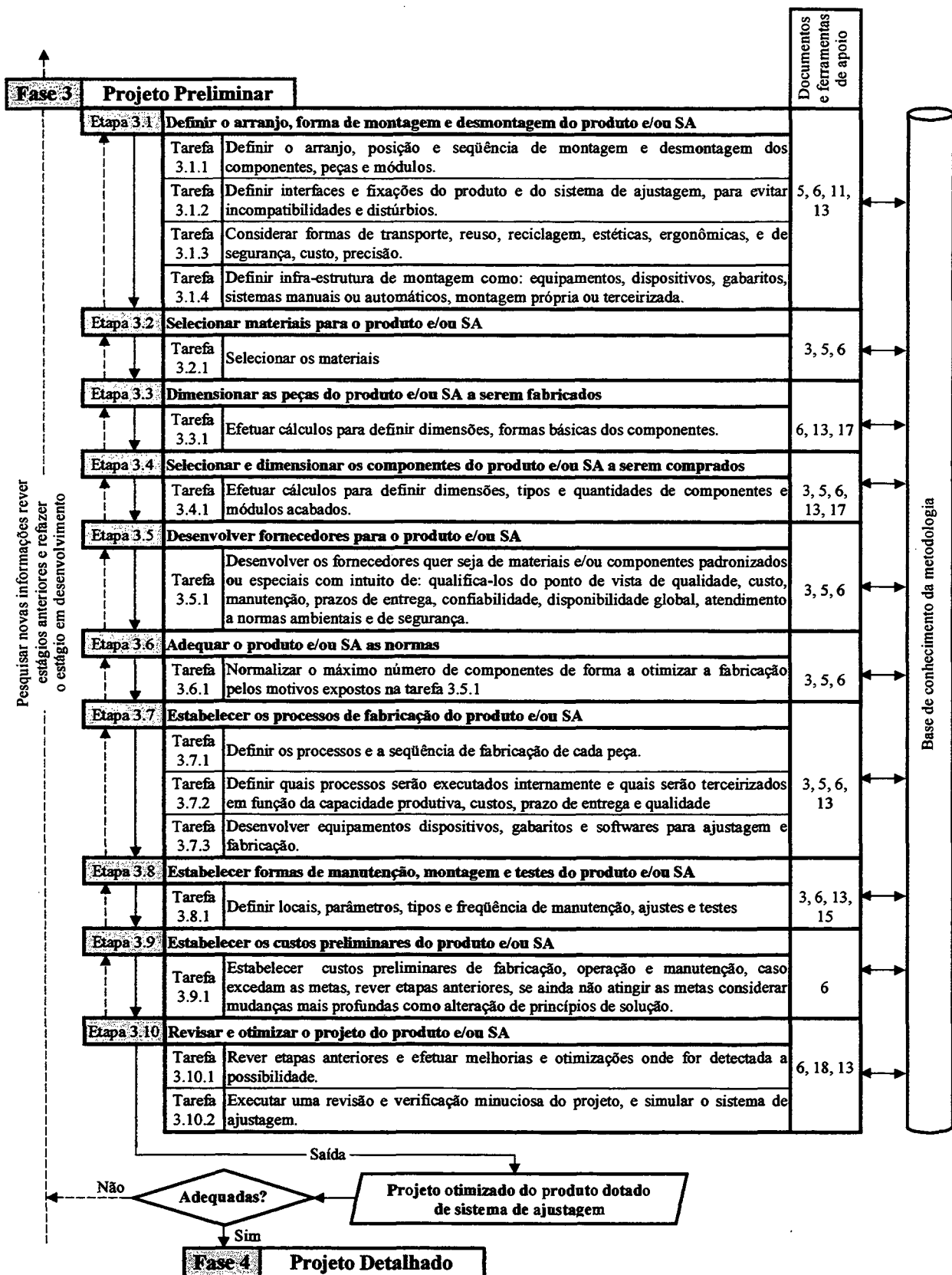


FIGURA 4.7. Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da fase 3: projeto preliminar.

4.1.4. FASE DE PROJETO DETALHADO

Nesta fase tem-se como informações de entrada, o projeto totalmente definido, com as peças, componentes e módulos dimensionados e selecionados. O sistema de ajustagem e/ou medidas tecnológicas, quando necessário o seu uso, também tem sua posição definida, e estão dimensionados. A infra-estrutura necessária para a ajustagem e fabricação está definida. O projeto nesta fase está pronto para ser detalhado. Esta fase é mostrada na figura 4.8.

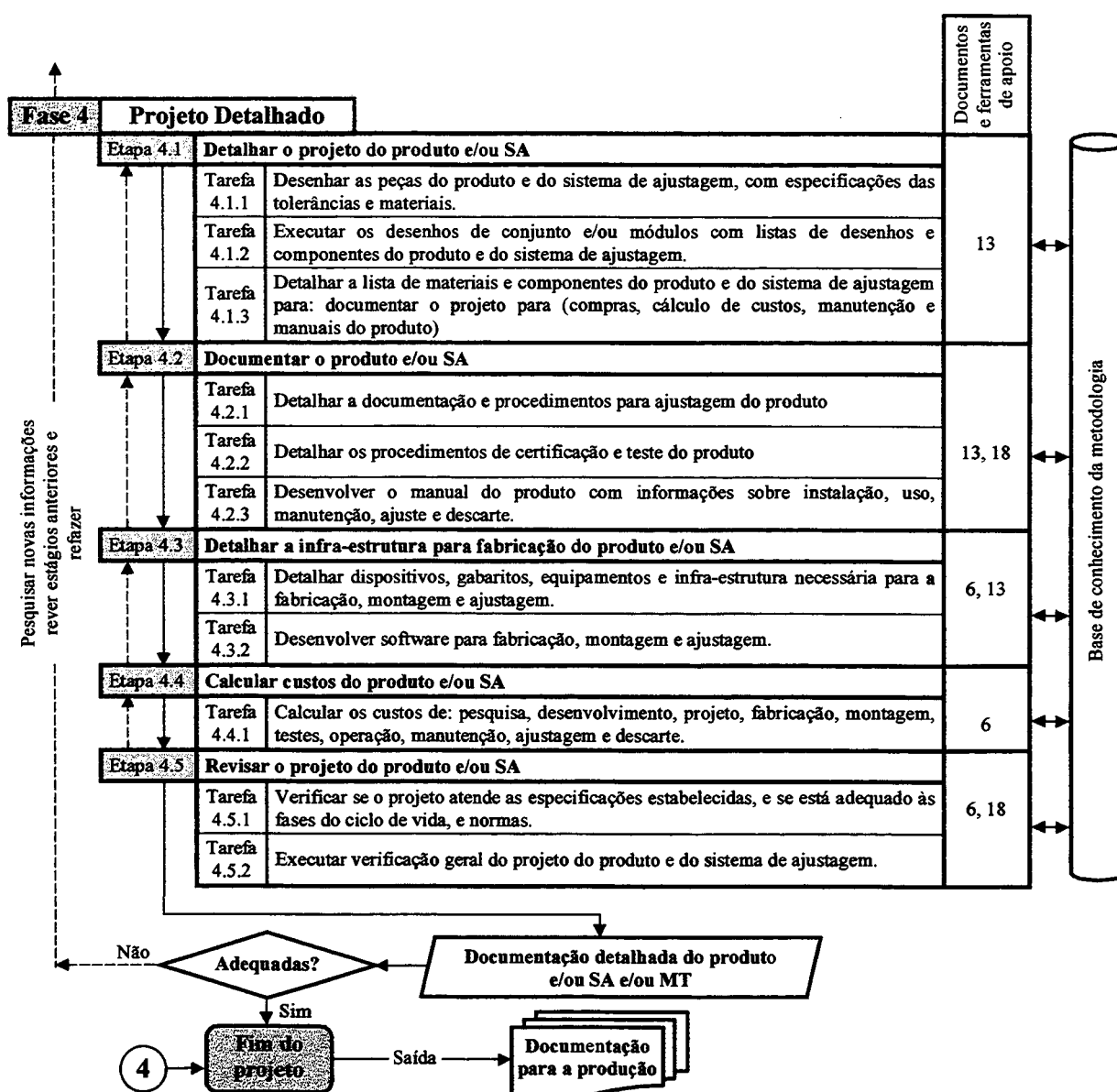


FIGURA 4.8. Metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, detalhe da continuação da fase 2: projeto conceitual.

Nesta fase são detalhadas todas as peças e módulos a serem fabricados e que compõe o produto, são geradas as listas detalhadas de material que especificam os componentes a serem adquiridos, as matérias primas necessárias a fabricação das peças, e a planilha de custos detalhada. Também são gerados os documentos para os clientes externos como: manual do produto que contém informações sobre a instalação e uso do produto, manutenção, testes, e os procedimentos de ajustagem.

4.2. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi proposta uma metodologia que faz uso das ferramentas e técnicas como a ajustagem, para o desenvolvimento de produtos de precisão, que foram apresentadas no capítulo 2.

A metodologia foi estruturada e detalhada na forma de um fluxograma, dividido em quatro fases que são: projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. Cada uma das fases está dividida em várias etapas, e sendo que cada etapa é compreendida por uma ou mais tarefas. O número de etapas e tarefas varia em função do tipo de projeto, se é um reprojeito ou um projeto novo. Isto ocorre pelo fato de que em um reprojeito parte-se de um conjunto de informações já definido no produto a ser reprojetado.

A partir do projeto informacional a metodologia orienta as ações a serem realizadas diferenciando se é um projeto novo ou um reprojeito.

Para que se possa desenvolver produtos de elevada precisão funcional, foi visto no capítulo 2, que a fase de projeto que apresenta maior potencial para isto é a fase de projeto conceitual. Em função disto, esta é a fase mais importante da metodologia, pois apresenta várias possibilidades para que a precisão seja obtida como o uso de: estruturas funcionais e princípios funcionais pouco sensíveis a erros, medidas tecnológicas e ajustagem, além disto permite a possibilidade de combinar estas medidas, e simulá-las. Caso a precisão não seja obtida, nesta fase é mais barato, fácil, rápido e tem-se um número bem maior de opções a serem testadas para se obter precisão funcional. Se um projeto já está definido, por exemplo, encontra-se detalhado, as alterações se tornam mais difíceis e caras, além de ter-se um número restrito de possibilidades para implementar a precisão. Assim sendo, a metodologia procura dotar o produto de precisão funcional, na fase de projeto conceitual, que é a fase onde isto tem a maior possibilidade de ocorrer, e os resultados podem apresentar maior efetividade.

Como contribuição a metodologia facilita a visualização do fluxo de informações, orienta a equipe de projetos ao longo do processo de projeto, em relação as etapas a serem seguidas, pois estas estão dispostas de forma adequada ao uso, fornece opções de ações a serem tomadas para a melhoria da precisão. Isto otimiza o processo de projeto e auxilia na tomada de decisões, tornando as fases do projeto mais rápidas, e conseqüentemente diminuindo o tempo de lançamento de um produto, fazendo com que tenha uma vantagem competitiva. Além disto a metodologia tem como principal característica implementar a precisão funcional de produtos, quer por medidas tecnológicas e/ou principalmente através de sistemas de ajustagem, que revelou-se uma técnica com grande potencial para a obtenção de tais objetivos.

A metodologia apresentada foi desenvolvida de forma a ser genérica para o projeto de produtos com exigência de precisão funcional, não importando o tipo de produto a ser desenvolvido, nem a magnitude de precisão envolvida. Por exemplo pode ser aplicada para produtos óticos de alta precisão onde trabalha-se com medidas na faixa de nanômetros, ou em máquinas agrícolas de precisão onde trabalhar-se na faixa de milímetros. Isto evidencia a flexibilidade de uso da metodologia proposta. Porém dependendo do produto a ser desenvolvido pode ser necessário a aplicação de etapas com tarefas específicas e adequadas a um produto em particular que deseja-se desenvolver.

É importante ressaltar que a metodologia proposta não altera o processo de projeto tradicional, porém agrega informações, ferramentas e principalmente técnicas, como a ajustagem que são voltadas ao projeto de produtos de precisão, e que tem como objetivo principal a obtenção de elevada precisão funcional sem no entanto fazer-se uso de componentes com a mesma magnitude de precisão.

Nos capítulos 5 e 6, através de aplicações bastante distintas como o reprojeção da cadeia cinemática de acionamento de um disco dosador para semeadoras de precisão, e do desenvolvimento de configurações modulares em um torno de ultraprecisão respectivamente, será feito o uso da metodologia com o objetivo de verificar a sua abrangência e efetividade.

definidas, gerando um potencial para a redução da quantidade de sementes por hectare. Outro aspecto que faz com que seja necessário o uso de semeadoras que tenham bom controle sobre a densidade de semeadura é a agricultura de precisão.

Segundo Reis (2000), as semeadoras de precisão com sistema dosador de discos horizontais, apresentam um elevado potencial de mercado e são o tipo mais usado no país, pois possuem custo bem mais baixo que outras semeadoras que usam outros princípios de solução, como as pneumáticas. Porém, independente da marca e tipo, todas ainda apresentam erros funcionais, assim um caminho para melhorar o desempenho das semeadoras é o uso da metodologia de projeto para melhorar a precisão funcional de produtos, como a apresentada no capítulo 4. O sistema dosador de disco horizontal, e o disco dosador é mostrado nas figura 5.1a e 5.1b.

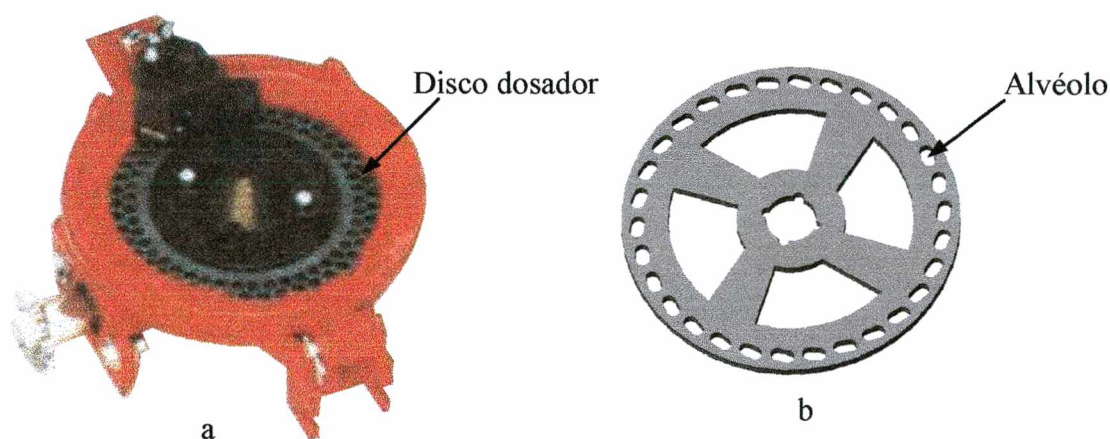


FIGURA 5.1. a) mecanismo dosador; b) modelo de disco dosador com uma carreira de alvéolos, Fankhauser (2000).

Para que uma semeadora apresente adequada precisão funcional, a semeadora depende do adequado funcionamento de todos os mecanismos que influem em sua precisão funcional. Assim para que o mecanismo dosador funcione adequadamente, o mecanismo dosador depende da qualidade e precisão de movimento fornecida pela cadeia cinemática que o aciona. E é esta cadeia cinemática e o disco dosador, mostrados esquematicamente na figura 5.2, que se pretende abordar neste estudo de caso.

Para ter-se uma melhor idéia da importância da qualidade e precisão do movimento de acionamento do disco dosador, Kepner *et al.* (1982) apud Reis (2000) citam o seguinte exemplo para ilustrar o problema: considerando-se um espaçamento entre sementes de 50mm e velocidade de semeadura de $4,8\text{km.h}^{-1}$, o tempo decorrido entre a deposição de duas sementes consecutivas é de 0,0375s, assim um atraso do movimento de acionamento do disco dosador com esta magnitude de tempo faz com que uma semente seja lançada junto da próxima semente, gerando erro de espaçamento, e consequentemente reduzindo a produtividade da cultura.

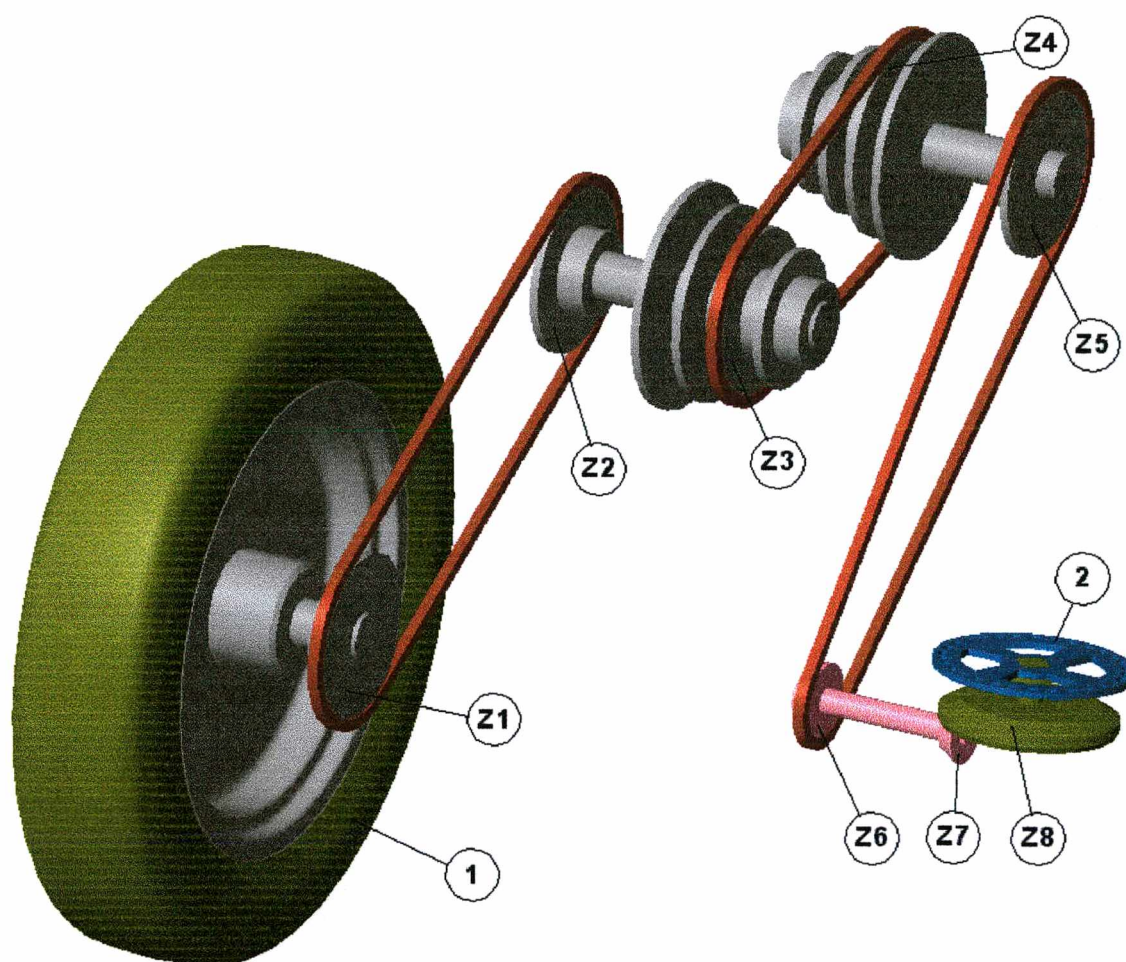


FIGURA 5.2. Desenho esquemático típico da cadeia cinemática de acionamento do disco dosador de uma semeadora de precisão. Onde: 1) roda e pneu, 2) disco dosador, Z1 e Z2) par de engrenamento do braço da roda, Z3 e Z4) par de engrenamento para regulagem da densidade de semeadura, Z5 e Z6) par de engrenamento do braço pantográfico, Z7 e Z8) par de engrenagens cônicas para mudança da direção de movimento

O acionamento do disco dosador é efetuado através do atrito da pneu da semeadora com o solo, e é transmitido através dos pares de engrenagem Z_1 à Z_6 por meio de corrente, e do

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO REPROJETO DA CADEIA CINEMÁTICA DE ACIONAMENTO DE UM DISCO DOSADOR DE UMA SEMEADORA DE PRECISÃO

Neste capítulo é apresentada a aplicação da metodologia proposta no capítulo 4, com o objetivo principal de verificar a abrangência e a efetividade da metodologia na cadeia cinemática de acionamento do disco dosador de uma semeadora de precisão, neste caso, com sistema dosador de disco horizontal. Os resultados desta aplicação deverão indicar a necessidade, ou não, de um reprojeto, ou um novo projeto, se é necessário, ou não, o uso de ajustagem, ou outros meios para implementar a precisão funcional. Antes de iniciar-se este estudo de caso é necessário conhecer o contexto no qual a semeadora está inserida.

O ato de semear e adubar visa a se colocar no solo, uma certa quantidade de sementes e fertilizante, de maneira que a cultura implantada apresente as melhores condições de desenvolvimento e produção. Para que isso ocorra, é necessário seguir as recomendações agronômicas, principalmente no que se refere a densidade, espaçamento e profundidade de deposição das sementes, juntamente com a quantidade e localização do fertilizante. A fim de que essa operação seja executada de maneira uniforme, rápida, precisa e econômica, lança-se mão de máquinas capazes de executar essas tarefas, ou seja, as semeadoras de precisão.

A elevação do custo da semente torna necessário o desenvolvimento de semeadoras que tenham um controle mais efetivo sobre a população de plantas, e tem justificado a crescente utilização de semeadoras de precisão. Além disto uma correta e uniforme densidade de semeadura é importante para que se possa obter o máximo de produtividade na área plantada, e menor gasto com sementes. Além do que para cada cultura e para cada variedade de semente de uma cultura existem recomendações agronômicas definindo o espaçamento entre sementes de maneira que se possa obter a máxima produtividade com uma densidade de semeadura apropriada. As semeadoras de precisão possuem mecanismos dosadores que permitem a colocação de sementes espaçadas umas das outras, dentro da linha de semeadura, com distâncias

par de engrenagens cônicas Z_7 e Z_8 até o disco dosador. O grupo de engrenagens Z_3 e Z_4 é usado para a regulação da velocidade do disco dosador, permitindo ajustar o espaçamento entre sementes. A seguir será feito o uso da metodologia no reprojeto da cadeia cinemática apresentada na figura 5.2.

5.1. PROJETO INFORMACIONAL

Nesta fase serão levantadas as informações necessárias ao início do projeto, como as necessidades do cliente, estabelecimento de requisitos e especificações de projeto, que serão usadas no desenvolvimento projeto.

5.1.1. IDENTIFICAR E REGISTRAR NECESSIDADES DO CLIENTE E/OU MERCADO

Este estudo de caso somente aborda a cadeia cinemática de acionamento do sistema dosador e o disco, com base na literatura, e consulta a especialistas, a necessidade principal é a qualidade de movimento do acionamento do sistema dosador. Para isto, a cadeia cinemática deve permitir ajustes precisos, além do que os ajustes precisam ser realizados com facilidade e rapidez, também deve ter baixo custo de fabricação e de manutenção. Assim são necessários componentes padronizados e de construção simples. Além disto os clientes necessitam de informações a respeito de qual a melhor forma de ajustar a cadeia cinemática, de maneira que se obtenha precisão funcional para diferentes situações de uso.

5.1.2. ESTABELECEER OS REQUISITOS DE PROJETO DO PRODUTO

O principal requisito de projeto é a precisão funcional, isto é, a precisão entre as distâncias das sementes, além disto neste reprojeto procurar-se-á fazer uso dos componentes já usados que são padronizados como as engrenagens e correntes de rolo.

Existem no mercado várias marcas de semeadoras que usam os mesmos princípios de solução dos que são usados neste estudo de caso, em função disto não é necessário a etapa que compreende analisar a existência de produtos concorrentes.

Neste estudo de caso a etapa que compreende a hierarquização dos requisitos de projeto com o uso da Casa da Qualidade, não foi usado pelo fato de ser um reprojeto de um produto já existente, e saber-se que o principal requisito de projeto é a precisão funcional do mecanismo dosador.

5.1.3. ESTABELECER AS ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

Baseado nas informações das etapas anteriores a cadeia cinemática de acionamento da semeadora deve ser capaz de prover precisão sob as seguintes especificações:

- Tipo de semeadora: de precisão com mecanismo dosador de disco horizontal;
- Distância de referência entre sementes X_{ref} : 149mm, para milho segundo Ogliari (1990);
- Distância de referência aceitável entre sementes 0,5 e 1,5 X_{ref} . 74,5mm a 223,5mm, ou seja os erros de espaçamento devem se situar em $\pm 74,5$ mm, segundo ABNT 04:015:06-004 (1994);
- Velocidade de teste da semeadora: 5 a 8 km/h ABNT 04:015:06-004 (1994).

Como trata-se de um reprojeto de uma cadeia cinemática já existente, é necessário identificar as fontes de erros, para fornecer informações para auxílio na tomada de decisões, do que deve ser feito, e para o modelamento e simulação do comportamento de erro.

5.1.4. IDENTIFICAR AS FONTES DE ERROS E DIREÇÕES SENSÍVEIS

Neste caso como somente será tratado da cadeia cinemática de acionamento do disco dosador e o próprio disco, a seguir serão abordadas as principais fontes de erros:

Escorregamento do pneu junto ao solo (tomada de torque de acionamento): de acordo com Sattler (2000), em testes de campo realizados com mais de 40 semeadoras os valores de escorregamento constante se situam na faixa de 0,5%, porém a variação do escorregamento situa-se na faixa de 3,15 a 8,77%. Estes são valores médios, o escorregamento de 0,5% pode ser compensado através da relação de transmissão dos pares de engrenagem de acionamento do dosador, e pode ser considerado constante no tempo. Porém a variação de escorregamento muda continuamente em relação ao tempo, e é o que causa erros funcionais, além do que não pode ser compensada, portanto deve ter sua influência cuidadosamente avaliada na precisão funcional. Outros problemas como variação da carga sobre o pneu e pressão de calibragem são irrelevantes.

Folgas na transmissão: Acontecem no início do movimento quanto a semeadora começa a ser puxada pelo trator, porém rapidamente os mecanismos assumem um comportamento como se não existissem folgas. Presume-se este comportamento pois considera-se que a força usada para puxar a semeadora atua em somente uma direção. Isto também compensa alguns tipos de folgas oriundas dos desgastes por uso.

Relação de transmissão: Grandes relações de transmissão funcionam como agente multiplicador dos erros de escorregamento. As relações de transmissão são função de dimensões

dos pneus, tipo e características do disco dosador como número de alvéolos e características agronômicas da cultura a ser semeada.

Erros dimensionais do disco dosador: os principais erros que podem ocorrer no disco dosador são dimensionais, ou seja, erros nos espaçamentos entre alvéolos. Quando isto ocorre, normalmente o espaço entre um ou mais alvéolos é menor que o nominal, e consequentemente o espaço entre alvéolos diferentes do nominal. Outros erros se reportam ao tamanho e forma dos alvéolos, que podem ser ocasionados por erros de projeto, fabricação ou desgastes, os erros devido a falha no enchimento dos alvéolos não serão considerados. Outros erros presentes na semeadora de precisão, porém que não pertencem à cadeia cinemática que está sendo reprojeta não serão considerados.

5.1.5. MODELAR E SIMULAR OS PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO

Conhecendo-se os erros que afetam a precisão funcional da semeadora, vistos na etapa anterior, estes erros serão usados para no auxílio ao modelamento matemático que descreve o comportamento dos erros da cadeia cinemática de acionamento do disco dosador, e o próprio disco. Na próxima etapa o modelo matemático será usado para realizar a simulação.

Cada cultura vegetal deve ser plantada segundo determinadas recomendações agronômicas. Uma destas recomendações refere-se ao espaçamento entre as sementes, ou seja, a densidade de semeadura. Portanto para garantir a correta densidade de semeadura a máquina semeadora deve depositar as sementes no solo em intervalos de tempo que depende da cultura a ser plantada e da velocidade da máquina semeadora. A expressão matemática que descreve esta relação é a equação (5.1).

$$t_d = \frac{s}{v} \quad (5.1)$$

Onde:

t_d = tempo decorrido entre o depósito de duas sementes consecutivas ou grupos de sementes no solo;

s = espaçamento entre duas sementes;

v = velocidade da semeadora.

O tempo t decorrido entre a passagem de dois alvéolos consecutivos pelo orifício de ejeção é descrito pela equação (5.2).

$$t = \frac{\alpha}{\omega_D} \quad (5.2)$$

Onde:

K = espaçamento angular entre dois alvéolos;

ω_D = velocidade angular do disco dosador.

Os desvios do espaçamento angular e da velocidade angular do disco exercem influência sobre o tempo t decorrido entre a passagem de dois alvéolos consecutivos, o que resulta numa variação do espaçamento entre as sementes depositadas no solo. Para avaliar a magnitude do erro total da semeadora, serão utilizados dois métodos que são:

Método 1: Cálculo do erro com o uso das variáveis de influência;

Método 2: Cálculo do erro com a comparação entre os valores nominais e os valores reais.

O objetivo de se usar os dois métodos de cálculo de erro, é para avaliar através dos resultados da simulação, a abrangência, vantagens, desvantagens de ambos os métodos em casos que podem apresentar grandes desvios, como a cadeia cinemática de acionamento do disco dosador, e selecionar o método mais adequado a este tipo de aplicação.

Método 1: Cálculo do erro com o uso das variáveis de influência

Conforme visto no capítulo 3, a variável de saída Δs , neste caso a variação do espaçamento das sementes, pode ser calculada através de variáveis de influência. Para tal deve-se expressar a variação do espaçamento das sementes relacionando as suas dependências, isto é, de quais variáveis os erros de espaçamento dependem. Neste caso o tempo decorrido entre a passagem de dois alvéolos consecutivos pelo orifício de ejeção Δt , e a velocidade da semeadora v , estão relacionados com Δs conforme mostrado na equação (5.3).

$$\Delta s = v * \Delta t \quad (5.3)$$

Derivando-se a equação (5.2), pode-se observar que Δt é função dos desvios do espaçamento angular do disco dosador $\Delta \alpha$ e da variação da velocidade angular do disco dosador $\Delta \omega_D$, mostrado na equação (5.4).

$$\Delta t = \frac{1}{\omega_D} * \Delta \alpha - \frac{\alpha}{\omega_D^2} * \Delta \omega_D \quad (5.4)$$

A velocidade angular ω_D do disco dosador pode ser calculada pela equação (5.5), que depende da velocidade angular ω_R calculada pela equação (5.6). Substituindo ω_R na equação (5.5) pela equação (5.6), tem-se a equação (5.7).

$$\omega_D = \omega_R * R_T \quad (5.5)$$

$$\omega_R = \frac{v}{r} * e_f \quad (5.6)$$

$$\omega_D = \frac{v}{r} * e_f * R_T \quad (5.7)$$

Onde:

ω_R = velocidade angular da roda da semeadora;

R_T = relação de transmissão entre roda e disco dosador;

r = raio da roda da semeadora;

e_f = coeficiente de deslizamento.

Derivando-se a equação (5.7), em função de e_f e de R_T , a variação da velocidade angular $\Delta\omega_D$ é expressa pela equação (5.8).

$$\Delta\omega_D = \frac{v}{r} (R_T * \Delta e_f + e_f * \Delta R_T) \quad (5.8)$$

Onde:

Δe_f = variação do coeficiente de escorregamento;

ΔR_T = diferença entre a relação de transmissão ideal, e a relação de transmissão disponível nos pares de engrenagens da semeadora.

Substituindo na equação (5.3) a equação (5.4) e posteriormente a equação (5.8), obtém-se a equação (5.9), e que pode ser escrita de forma análoga à equação (5.3), com suas variáveis de influência ε_α equação (5.11), ε_{ef} equação (5.12) e ε_{Rt} equação (5.13) multiplicando os desvios $\Delta\alpha$, Δe_f e ΔR_T conforme a equação (5.10).

$$\Delta s = \frac{v}{\omega_D} \Delta\alpha - \frac{\alpha * v^2}{r * \omega_D^2} (R_T * \Delta e_f + e_f * \Delta R_T) \quad (5.9)$$

$$\Delta s = \varepsilon_\alpha * \Delta\alpha + \varepsilon_{ef} * \Delta e_f + \varepsilon_{Rt} * \Delta R_T \quad (5.10)$$

Os respectivos números de influência são:

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{v}{w_D} \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_{ef} = -\frac{\alpha * v^2 * R_T}{r * w_D^2} \quad (5.12)$$

$$\varepsilon_{RT} = -\frac{\alpha * v^2 * e_f}{r * w_D^2} \quad (5.13)$$

Onde:

ε_{α} = número de influência do desvio angular entre alvéolos;

ε_{ef} = número de influência da variação do coeficiente de escorregamento;

ε_{RT} = número de influência da diferença entre a relação de transmissão ideal e a real.

Método 2: Cálculo do erro com a comparação entre os valores nominais e os valores reais:

Outra forma de calcular o erro do espaçamento de semeadura é pelo uso da seguinte equação:

$$\Delta s = s_{real} - s_{nom} \quad (5.14)$$

Onde:

s_{real} = espaçamento real entre as sementes;

s_{nom} = espaçamento nominal entre as sementes.

O espaçamento real entre as sementes é dado pela equação (5.15):

$$s_{real} = \frac{\alpha * r}{R_T * e_f} \quad (5.15)$$

Os valores das variáveis a serem substituídos na equação (5.15) devem ser os valores reais, isto é, os valores nominais acrescidos dos erros, isto é mostrado na equação (5.16).

$$s_{real} = \frac{(\alpha_{nom} + \Delta\alpha) * r_{nom}}{(R_{T_{nom}} + \Delta R_T) * (e_{f_{nom}} + \Delta e_f)} \quad (5.16)$$

A seguir será feita a simulação da cadeia cinemática de acionamento para avaliar seu comportamento de erro, e para isto será feito o uso de uma planilha eletrônica, em função de ser uma ferramenta bastante difundida, de fácil uso e disponibilidade. A planilha permite simular

várias combinações com diferentes parâmetros de cálculo, mostra-las em forma de tabela para uma fácil comparação. Também é possível fazer, rápida e automaticamente, diferentes tipos de gráficos com os dados da tabela.

As planilhas das simulações foram montadas com as equações desenvolvidas no item 5.1.5. A seguir é mostrada a nomenclatura usada para auxiliar a interpretação das planilhas:

No = numeração das linhas na planilha;

v = velocidade da semeadora (km/h), são valores atribuídos nas tabelas cuja faixa é a utilizada para testes das semeadoras;

r = raio externo da roda da semeadora, incluindo o pneu (m), são valores atribuídos nas tabelas cuja dimensão é a normalmente utilizada pelos fabricantes;

na = quantidade de alvéolos do disco dosador, são valores atribuídos nas tabelas e são aqueles usados por fabricantes, neste caso o disco dosador e sua quantidade de furos é para a semeadura de milho;

$\Delta\alpha$ = erro de espaçamento angular entre dois alvéolos consecutivos ($0,02^\circ$ a $0,25^\circ$), são valores atribuídos nas tabelas e que se situam na faixa de precisão para este tipo de componente;

ε_α = variável de influência em função do erro angular entre dois alvéolos consecutivos e é calculada pela equação (5.11).

Δs_α = valor de erro do espaçamento entre sementes devido a $\Delta\alpha$ (mm), e é calculado pela equação (5.17) para o método de cálculo de erros com os valores de influência, e pela equação (5.18) para o método de cálculo dos erros através da comparação entre os valores nominais e os valores reais.

$$\Delta s_\alpha = \Delta\alpha * \varepsilon_\alpha \quad (5.17)$$

$$\Delta s_\alpha = \frac{(\alpha_{nom} + \Delta\alpha) * r_{nom}}{R_{Tnom} * e_{fnom}} - s_{nom} \quad (5.18)$$

Onde: α_{nom} é calculada pela equação (5.19).

$$\alpha_{nom} = \frac{360}{na} \quad (5.19)$$

R_{Tnom} = relação de transmissão ideal necessária para não haver erros na semeadora, é calculada pela equação (5.20);

$$R_{Tnom} = \frac{\omega_D * r}{v * e_f} \quad (5.20)$$

Onde: ω_D é calculado pela equação (5.21).

$$\omega_D = \frac{v}{s_{nom} * na} \quad (5.21)$$

R_T = relação de transmissão disponível na semeadora, é calculada pela relação entre os pares de engrenagens instaladas na semeadora, pela equação (5.22).

$$R_T = \frac{Z_1 * Z_3 * Z_5 \dots * Z_n}{Z_2 * Z_4 * Z_6 \dots * Z_{n+1}} \quad (5.22)$$

ΔR_T = calculado pela equação (5.23);

$$\Delta R_T = R_T - R_{Tnom} \quad (5.23)$$

ε_{RT} = valor de influência em função da diferença de R_T e R_{Tnom} , e é calculado pela equação (5.13).

$\Delta s R_T$ = valor de erro do espaçamento entre sementes devido a ΔR_T (mm), e é calculado pela equação (5.24) para o método de cálculo de erros com os valores de influência, e pela equação (5.25) para o método de cálculo dos erros através da comparação entre os valores nominais e os valores reais.

$$\Delta s R_T = \Delta R_T * \varepsilon_{RT} \quad (5.24)$$

$$\Delta s R_T = \frac{\alpha_{nom} * r_{nom}}{(R_{Tnom} + \Delta R_T) * e_{fnom}} - s_{nom} \quad (5.25)$$

ef = escorregamento (0,5%), são valores atribuídos nas tabelas e são estipulados por Sattler (2000);

Δe_f = valores de variação do escorregamento (3,2 a 8,8%), são valores atribuídos nas tabelas e são estipulados por Sattler (2000);

ε_{ef} = variável de influência em função da variação do escorregamento, e seu valor é calculado pela equação (5.12);

$\Delta s e_f$ = valor de erro do espaçamento entre sementes devido a Δe_f (mm), e é calculado pela equação (5.26) para o método de cálculo de erros com os valores de influência, e pela equação

(5.27) para o método de cálculo dos erros através da comparação entre os valores nominais e os valores reais.

$$\Delta s_{ef} = \Delta e_f * \varepsilon_{ef} \quad (5.26)$$

$$\Delta s_{ef} = \frac{\alpha_{nom} * r_{nom}}{R_{Tnom} * (e_{fnom} + \Delta e_f)} - s_{nom} \quad (5.27)$$

Δs = valor de erro total do espaçamento entre sementes (mm), e é calculado pela equação (5.10) para o método de cálculo de erros com as variáveis de influência, e pela equação (5.16) para o método de cálculo dos erros através da comparação entre os valores nominais e os valores reais.

$\pm \Delta s_{adm}$ = é o erro máximo admissível entre o espaçamento das sementes, e é calculado segundo o projeto de norma ABNT 04:015:06-004, (1994), como sendo 0,5 e 1,5* X_{ref} . Aqui X_{ref} é denominado de s_{nom} , e que para a cultura do milho segundo Ogliari (1990), $s_{nom} = 149\text{mm}$. Assim sendo $\Delta s_{adm} = \pm 74,5\text{mm}$.

No anexo 2 é apresentada uma tabela com a simulação do comportamento do erro com o uso das variáveis de influência, através da equação (5.10). A simulação do comportamento de erro com a comparação entre os valores nominais e os valores reais, através da equação (5.16), é mostrada na tabela do anexo 3. As tabelas dos anexos 2 e 3 servem apenas para a construção dos gráficos de comparação entre os dois métodos, figuras 5.3, 5.4 e 5.5, e para que se possa visualizar como foi montada as tabelas nas planilhas. Para a interpretação dos resultados da simulação o mais importante são os gráficos gerados com os dados atribuídos e os valores calculados na simulação através das planilhas, assim sendo as tabelas usadas para a construção dos outros gráficos não serão mostradas.

Para a construção do gráfico da figura 5.4, são usados os dados da tabela do anexo 2, colunas ΔR_T e $\Delta s R_T$, e as linhas 7 a 13 mostrados em linha contínua e chamada de método 1, ou seja, simulação do comportamento de erro com o uso das variáveis de influência. A linha preta mostrada no gráfico da figura 5.4, que é chamada de método 2, ou seja, simulação do comportamento de erro com a comparação entre os valores nominais e os valores reais, e é feita a partir dos dados da tabela do anexo 3, colunas ΔR_T e $\Delta s R_T$ e as linhas 7 a 13. Os outros gráficos são construídos de forma análoga ao da figura 5.4

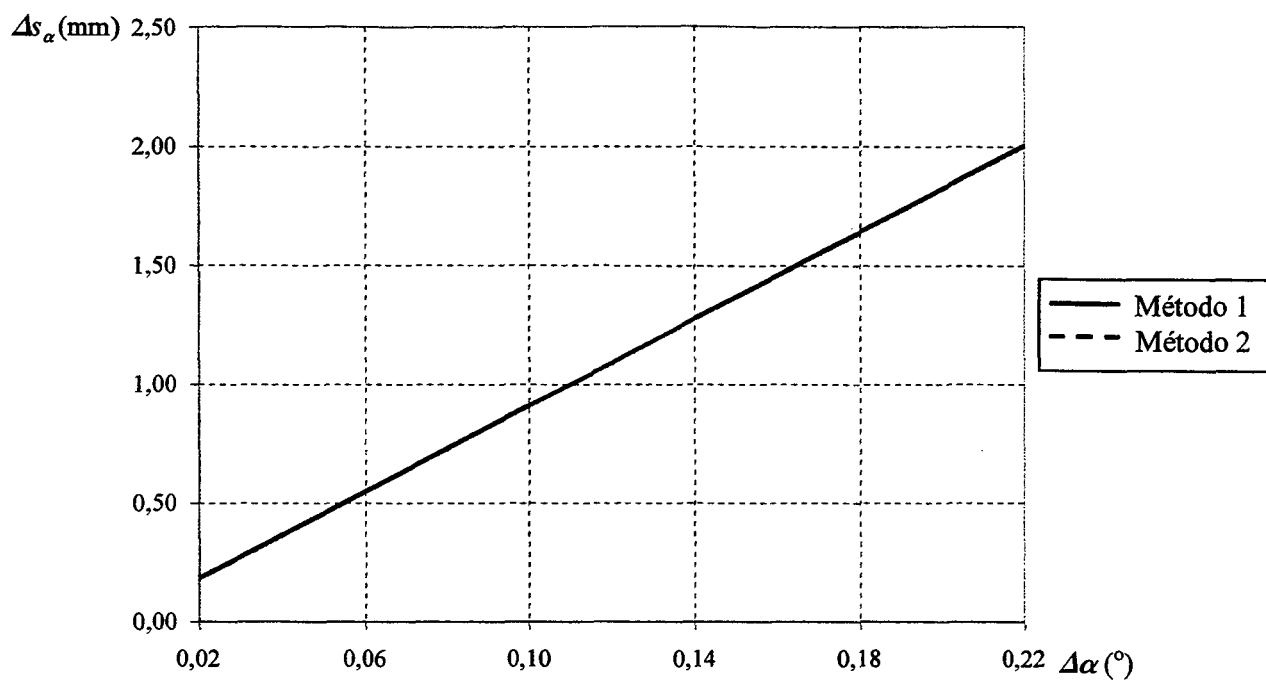


FIGURA 5.3. Gráfico de comparação entre os métodos 1 e 2 para a parcela de erro de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido ao erro de espaçamento entre dois alvéolos $\Delta\alpha$.

Obs. Na figura 5.3 as linhas do gráfico de comparação entre os métodos estão sobrepostas.

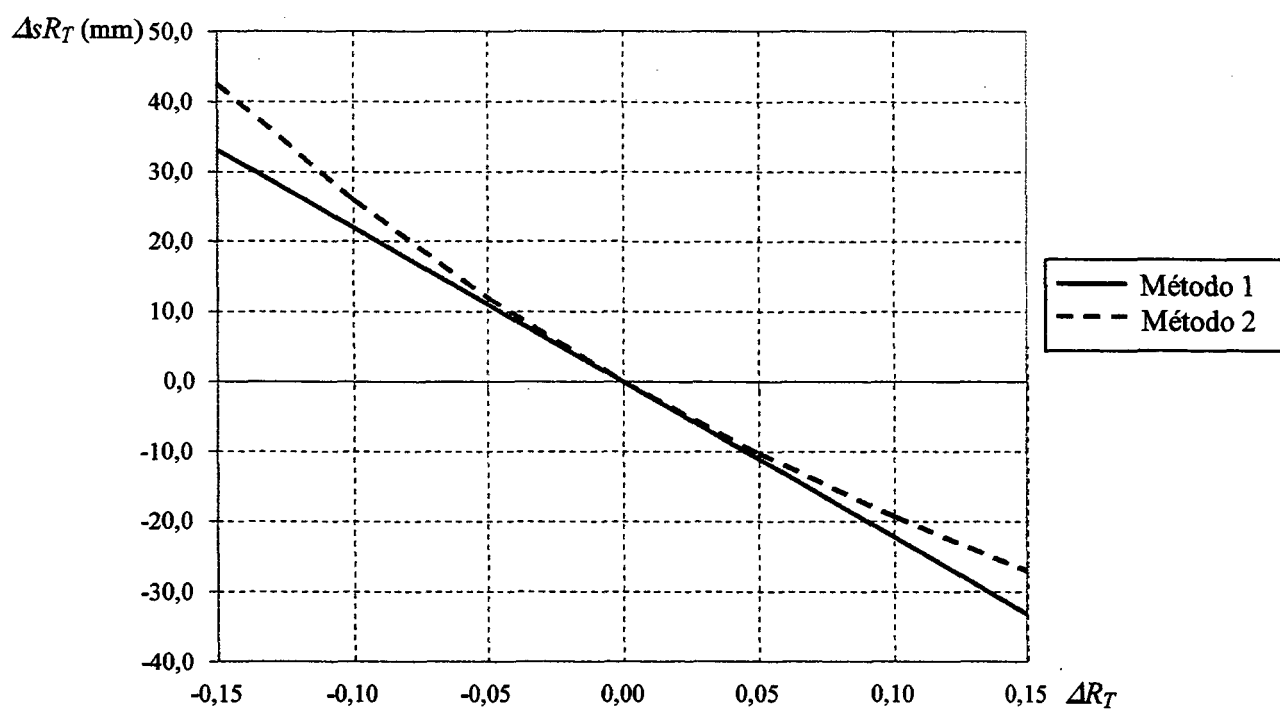


FIGURA 5.4. Gráfico de comparação entre os métodos 1 e 2 para os erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido ao erro na relação de transmissão ΔR_T .

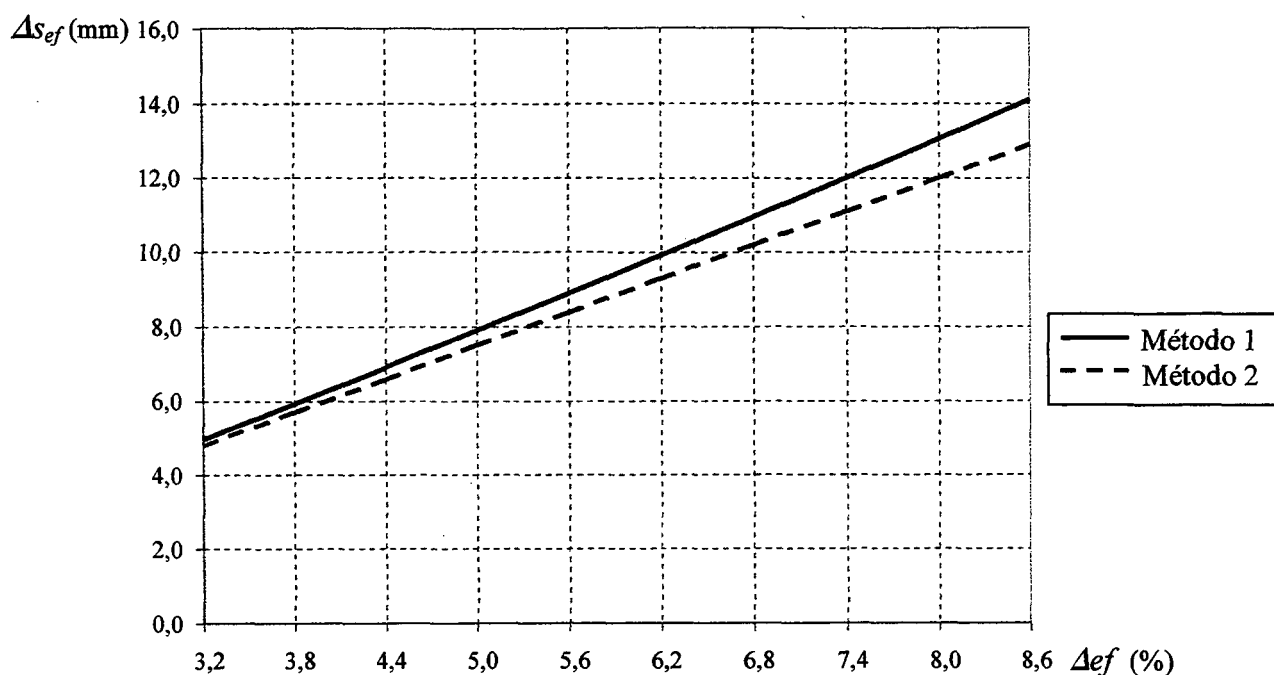


FIGURA 5.5. Gráfico de comparação entre os métodos 1 e 2 para a parcela de erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a variação de escorregamento Δe_f .

Analisando-se o gráfico da figura 5.3 que compara os métodos para os erros $\Delta \alpha$, observa-se que o comportamento de erros Δs_α é o mesmo para ambos os métodos, pequenas diferenças nos valores de erro são em função de arredondamentos usados nas fórmulas de cálculo, em função disto a reta de ambos os métodos estão sobrepostas. Além disto os erros Δs_α tem comportamento linear, portanto ambos os métodos podem ser usados neste caso, mesmo para grandes valores de erro $\Delta \alpha$.

O gráfico da figura 5.4 que compara os métodos para os erros ΔR_T , apresenta valores e mostra comportamento diferentes de erros para ambos os métodos, principalmente para valores de R_T menores que 1, e para desvios maiores de ΔR_T . Isto se deve ao fato de que o comportamento do erro $\Delta s R_T$ não ser linear, e o método 2 mostra claramente isto no gráfico da figura 5.4. Como no método 1 as equações utilizadas foram deduzidas de forma análoga à propagação linear do erro, no gráfico da figura 5.4 o comportamento do erro $\Delta s R_T$ é uma reta, o que não mostra o comportamento real do erro $\Delta s R_T$. Pois para valores R_T menores que 1, e para grandes valores de ΔR_T negativos a curva de $\Delta s R_T$ apresenta uma inclinação mais acentuada e com valores de $\Delta s R_T$ maiores em módulo que para os mesmos valores de ΔR_T positivos, isto também pode ser observado pelo gráfico da figura 5.10. Assim sendo se deseja-se analisar o

comportamento de erros para grandes valores de variáveis de entrada neste caso ΔR_T , e cujas variáveis de saída neste caso $\Delta s R_T$ não apresentem comportamento linear, o método 1 não é indicado, pois além de não se conseguir visualizar claramente o comportamento dos erros, a diferença de valores de $\Delta s R_T$ podem apresentar valores inadequados para uma análise. Porém o método 2 dificulta a realização de uma análise individual da influência de cada variável de entrada na composição do erro total, isto é, cada parcela de erro que afeta a precisão funcional. Uma análise análoga a esta pode ser feita no gráfico da figura 5.5, onde Δs_{ef} tem um comportamento não linear, e para grandes valores de Δef o método 1 não é indicado. Em função disto as análises neste caso serão feitas pelo método 2, e podem ser vistas a seguir nos gráficos das figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11, juntamente com uma discussão dos resultados.

Mantendo-se constante o valor dos parâmetros de entrada como r , na , $\Delta\alpha$ e Δef constantes, pode-se observar que a velocidade da semeadora não irá influenciar os valores de Δs . Isto se deve ao fato de que esta é uma simulação cinemática do acionamento do disco dosador da semeadora. Caso seja feita uma simulação dinâmica, e que envolva toda a semeadora a velocidade terá influência nos erros de espaçamento entre sementes.

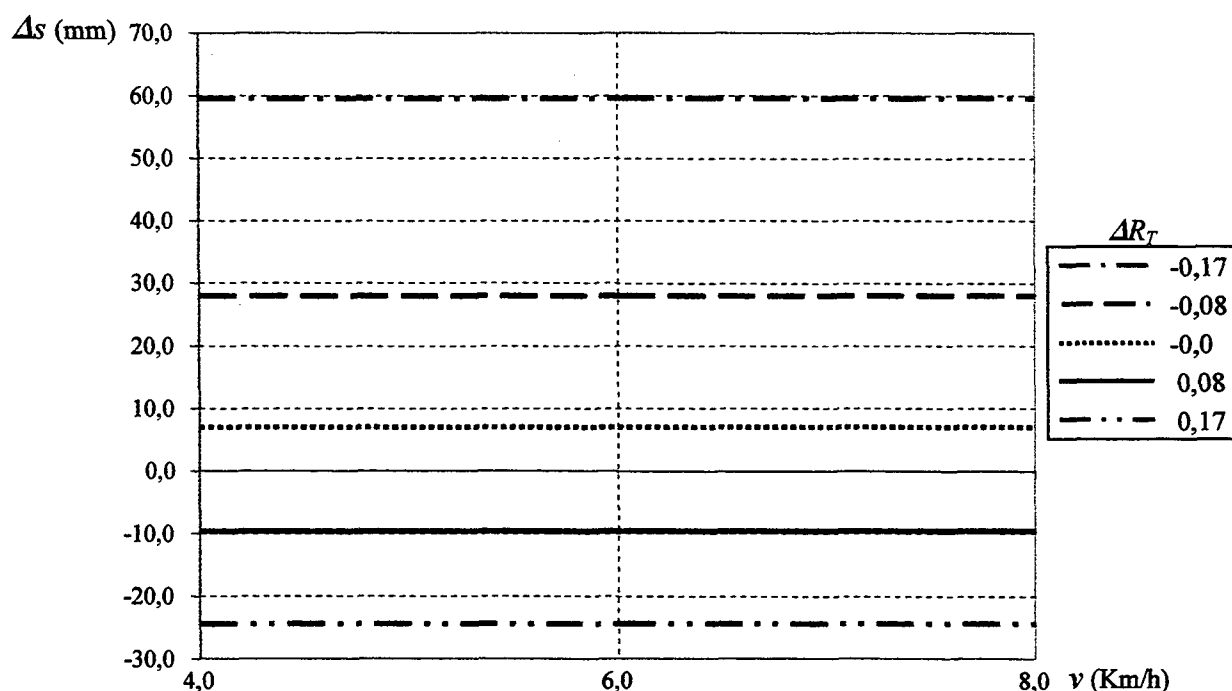


FIGURA 5.6. Gráfico da simulação dos erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes valores de velocidade da semeadora v e para diferentes valores erros de relação de transmissão ΔR_T .

A variação de r somente influencia ΔR_T , $\Delta s R_T$ e Δs , pois se $\Delta R_T = 0$ para diferentes r observa-se pela figura 5.7 que Δs não varia, além disto aumentando o r , a R_T também aumenta, fazendo com que Δs diminua, isto também pode ser visto na figura 5.10. A figura 5.7 também mostra que na seleção de uma relação de transmissão, sempre deve-se optar por aquela que propicia valores de ΔR_T positivos, pois desta maneira os valores de $\Delta s R_T$ serão negativos e se somarão aos valores de Δe_f que são sempre positivos neste caso, e os valores em modulo de Δs serão menores. Isto também pode ser visto na figura 5.8.

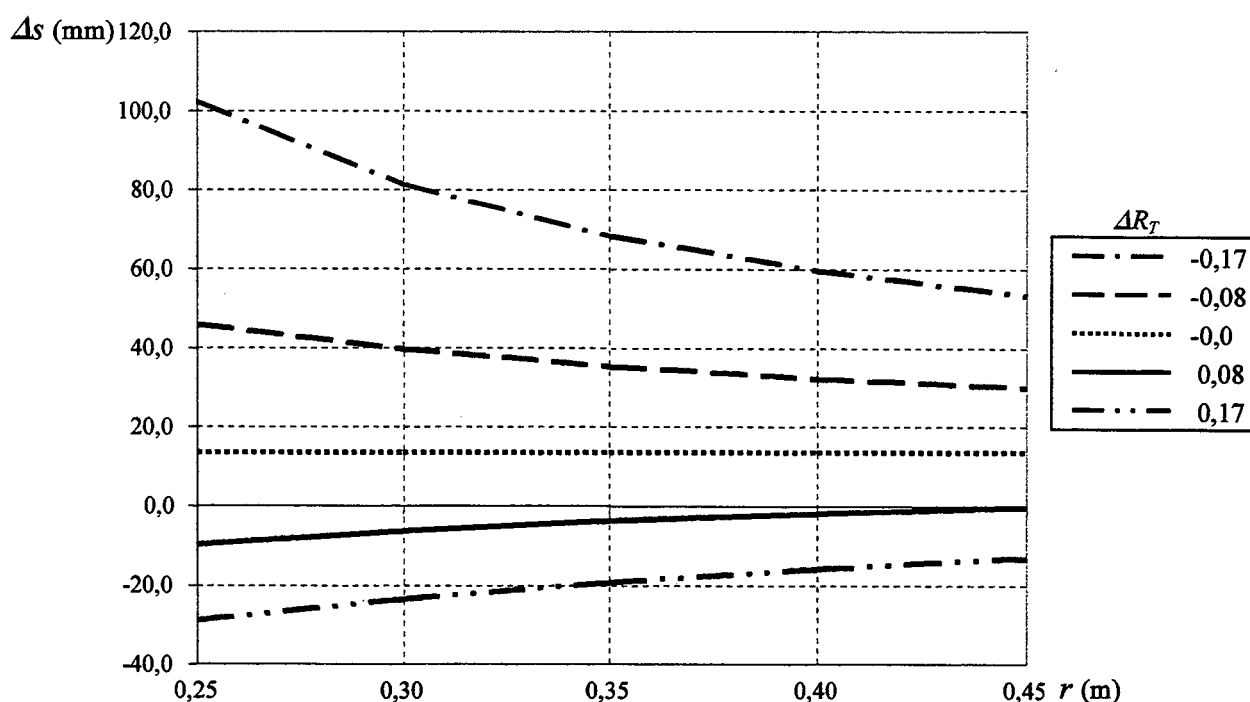


FIGURA 5.7. Gráfico da simulação dos erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes valores de raio da roda r e diferentes valores de erros de relação de transmissão ΔR_T .

O erro total Δs e Δs_α aumenta em módulo com o aumento de na , isto é mostrado na figura 5.8 e 5.9, isto se deve ao fato de que o espaçamento angular α entre os alvéolos diminuirá, e portanto a proporção de $\Delta\alpha$ em relação a α será maior. A variável $\Delta\alpha$ tem influência em Δs_α e Δs , e a variável na tem influência em Δs_α , R_T , ΔR_T , $\Delta s R_T$ e Δs . Quando na aumenta, R_T diminui, aumentando também os erros, isto pode ser visto na figura 5.10.

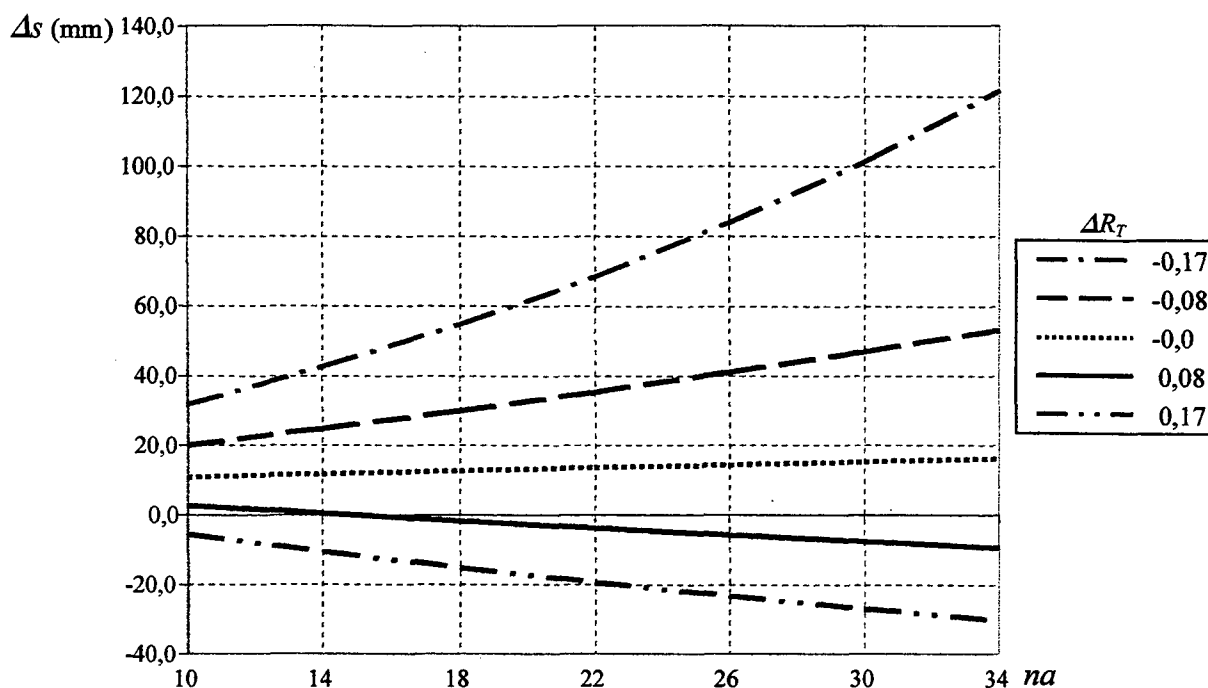


FIGURA 5.8 Gráfico da simulação dos erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes quantidades de alvéolos na no disco dosador e de diferentes valores de erros de relação de transmissão ΔR_T .

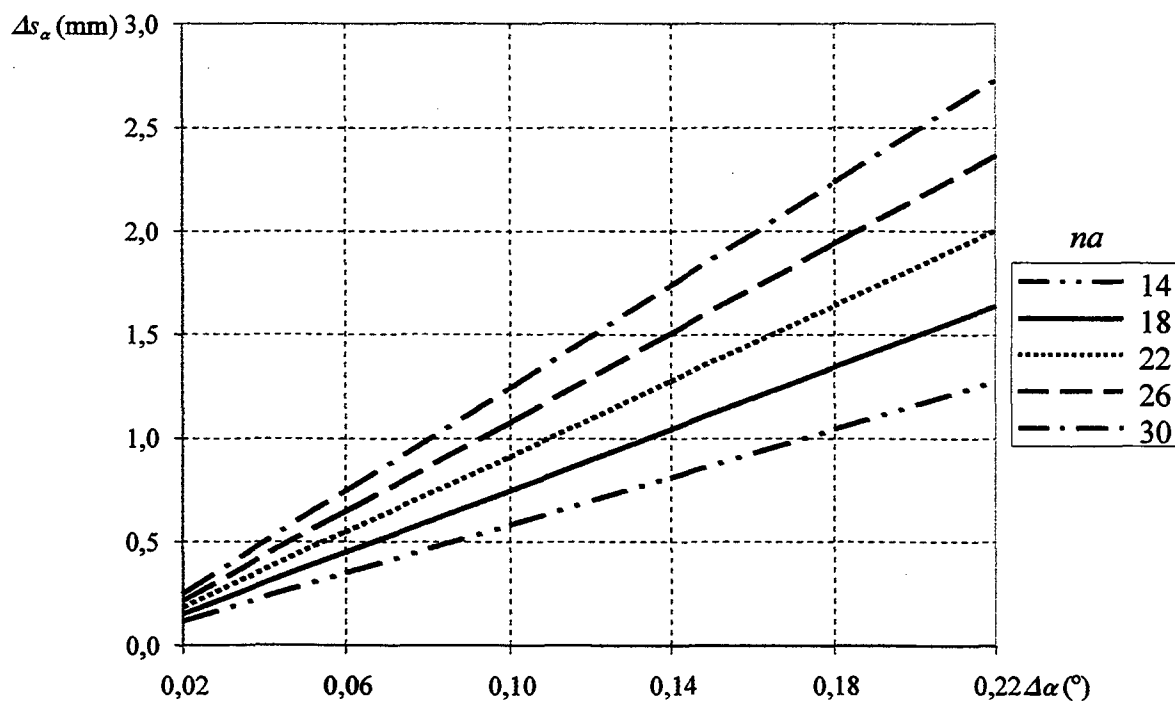


FIGURA 5.9. Gráfico da simulação da parcela de erro de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido ao erro de espaçamento entre dois alvéolos $\Delta \alpha$, e a diferentes quantidades de alvéolos na do disco dosador.

A figura 5.10 mostra que grandes valores de R_T apresentam valores de $\Delta s R_T$ menores e mais constantes mesmo para valores maiores de ΔR_T , pois quanto maior R_T para um mesmo ΔR_T , proporcionalmente menor será $\Delta s R_T$.

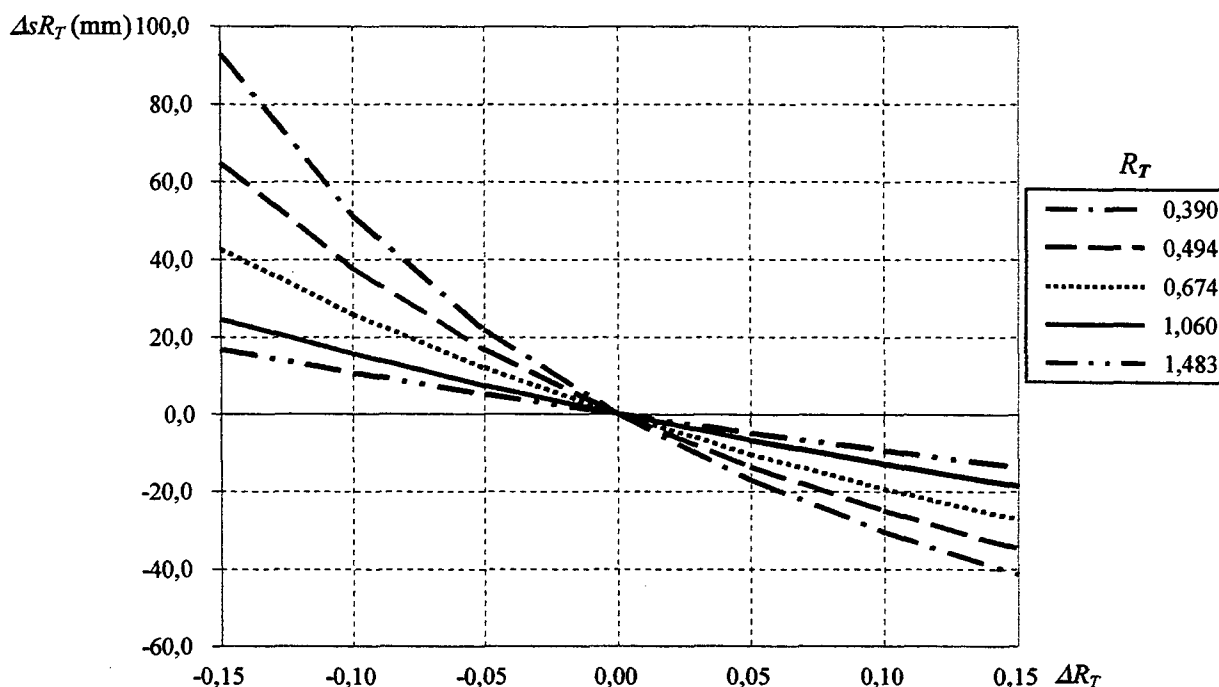


FIGURA 5.10. Gráfico da simulação da parcela de erro de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes erros de relação de transmissão ΔR_T , e para diferentes valores de relação de transmissão R_T .

Para uma regulagem mais precisa da cadeia cinemática de acionamento da semeadora mostrada na figura 5.2, deve-se usar engrenagens com maior número de dentes, como exemplo: uma regulagem dos pares $Z3=40$ e $Z4=42$ com $Z3=43$ e $Z4=45$ apresenta diferenças menores que $Z3=30$ e $Z4=32$ com $Z3=33$ e $Z4=35$.

O escorregamento ef é constante e pode ser compensado pelas relações de transmissão R_T e não produz erros. Porém Δef é mais difícil de ser compensado pois depende de fatores localizados que podem variar constantemente no ato da semeadura como: grau de compactação do solo, teor de umidade entre outros, se tais fatores forem conhecidos e forem mais uniformes em determinada área, com estudos mais aprofundados sobre o escorregamento será possível atenuar os erros oriundos de tais causas através de compensações na R_T . O ef e Δef , apenas influenciam Δs_{ef} e Δs , isto pode ser visto na figura 5.11, onde para diferentes R_T , as três curvas estão sobrepostas.

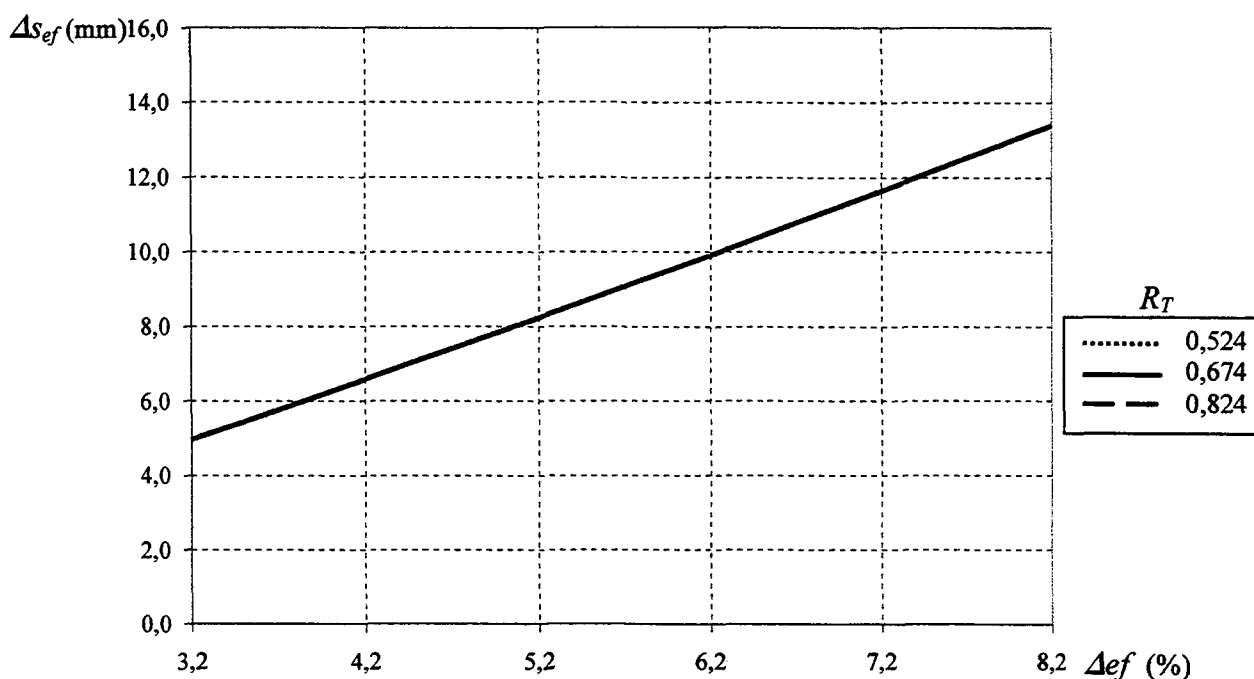


FIGURA 5.11. Gráfico da simulação da parcela de erro de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a variação de escorregamento Δef , e para diferentes valores de relação de transmissão R_T .

Obs.: Pelo fato do uso de diferentes relações de transmissão R_T não influenciarem na parcela de erro de escorregamento Δs_{ef} para diferentes valores de escorregamento Δef as linhas do gráfico da figura 5.11 estão sobrepostas.

A seguir será feita a simulação da precisão funcional da cadeia cinemática de acionamento e do disco dosador mostrada pelo gráfico da figura 5.12 para a seguinte condição: $v = 8 \text{ km/h}$, $r = 0,35\text{m}$, $na = 22$, $\Delta\alpha = 0,22^\circ$, $ef = 0,5\%$, $\Delta s_{adm} = \pm 74,5 \text{ mm}$, estes valores são mantidos constantes. Os valores de ΔR_T irão variar pois estão sujeitos a erros causados pela regulagem feita no uso. Os valores de Δef também irão variar pois, dependem das características da área a ser semeada e podem variar ao longo da semeadura. Outras condições como diferentes culturas a serem semeadas e com espaçamentos diferentes, e outros parâmetros da cadeia cinemática da semeadora podem ser facilmente testados para verificar se atendem os requisitos de precisão, pois a implementação do modelo matemático de comportamento dos erros na planilha é paramétrico, bastando apenas trocar os valores para que uma nova simulação seja automaticamente realizada.

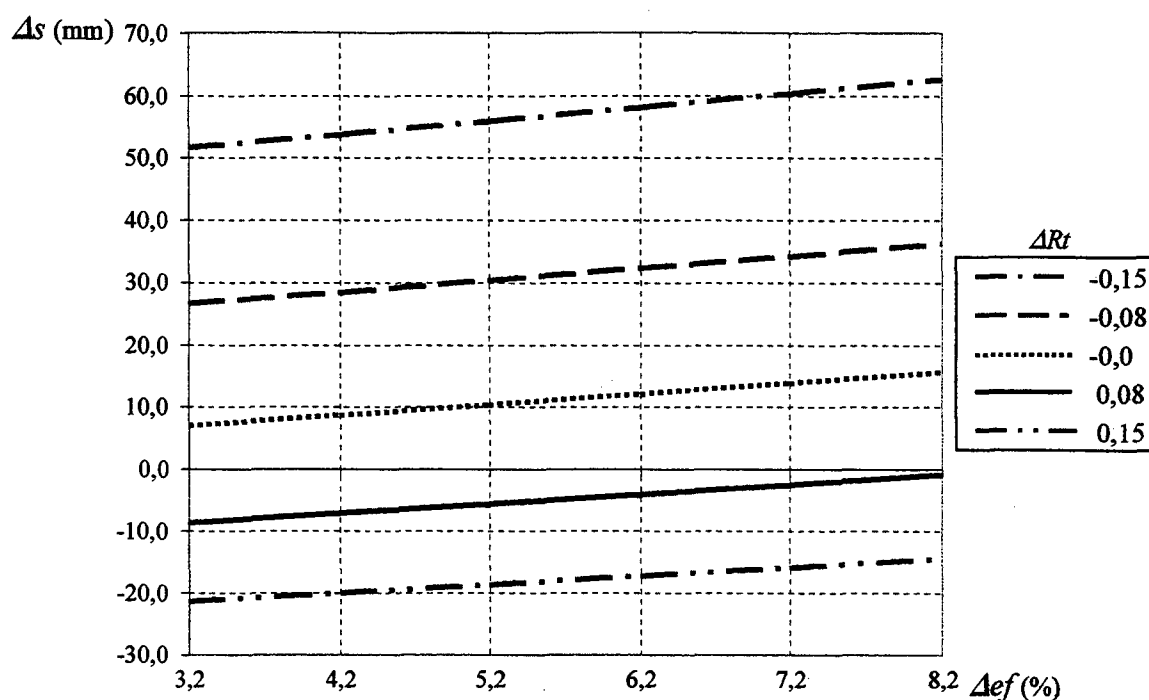


FIGURA 5.12. Gráfico da simulação dos erros de espaçamento entre duas sementes consecutivas devido a diferentes valores de escorregamento Δe_f , e para diferentes valores de erros de relação de transmissão ΔR_t .

O gráfico da figura 5.12, permite observar que o projeto atual da cadeia cinemática de acionamento e do disco dosador, atende a precisão meta que neste caso é $\Delta s_{adm} = \pm 74,5$ mm, pois o maior valor de erro $\Delta s = 63$ mm, mesmo para o caso mais crítico com $\Delta R_t = -0,15$ e $\Delta e_f = 8,2\%$ é aceitável do ponto de vista de precisão. Assim sendo não é necessário realizar as outras etapas da metodologia.

5.2. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A modelagem e simulação da cadeia cinemática de acionamento e do disco dosador da semeadora de precisão permitiu se chegar as seguintes conclusões:

- De acordo com o resultado das simulações para este caso, conclui-se que o projeto atual das partes modeladas e simuladas da semeadora, apresenta precisão funcional suficiente para que as sementes sejam depositadas em espaçamentos cujos erros estejam dentro dos valores permissíveis, ou seja, que os erros se situem neste caso dentro dos valores máximo e mínimo aceitáveis, $\pm \Delta s_{adm} = 74,5$ mm. Em função disto não foi necessário executar as outras fases da metodologia, e nem é necessário fazer mudanças nos princípios de solução simulados,

apenas deve-se tomar o cuidado no dimensionamento e regulagem da cadeia cinemática de acionamento do disco dosador.

- A variação na velocidade da semeadora v , não tem influência em sua precisão funcional, e em nenhuma outra variável usada na simulação. Isto se deve ao fato de que esta é uma simulação cinemática do acionamento do disco dosador da semeadora. Caso seja feita uma simulação dinâmica, e que envolva toda a semeadora a velocidade terá influência nos erros de espaçamento entre sementes;
- A magnitude do erro decresce com o aumento do raio r da roda da semeadora;
- Quanto menor o espaçamento angular entre os alvéolos do disco dosador mais precisa deve ser sua construção;
- Quanto maior a relação de transmissão menor os erros de espaçamento entre sementes devido a erros na relação de transmissão;
- Quanto maior o número de dentes das engrenagens utilizadas para a regulagem de dosagem de sementes, menores os erros de espaçamento entre sementes, pois mais precisas podem ser as regulagens;
- Quanto maior a relação de transmissão, menores os erros funcionais devido aos erros de relação de transmissão;
- Erros Δs são minimizados se for selecionada uma relação de transmissão com ΔR_T positivo;
- O escorregamento do pneu junto ao solo pode ser compensado por ajustes nas engrenagens utilizadas para a regulagem de dosagem de sementes;
- O uso da metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão otimizou o processo de projeto e as tomadas de decisão, além do auxílio em apontar o que deve ser feito para a melhora da precisão funcional;
- A metodologia foi útil para orientar a sequência de atividades a serem desenvolvidas, e os resultados das simulações mostraram como o erro se comporta, e quais as medidas a serem tomadas para implementar a precisão funcional, além de indicar quais partes mais contribuem para os erros;
- Do ponto de vista da seleção do método de modelagem e simulação, esta aplicação permitiu que se observasse que o método de cálculo de erros através dos números de influência não apresenta resultados satisfatórios em aplicações que trabalham com grandes desvios, e onde os erros apresentam-se de forma não linear, em função disto não é possível observar-se o real

comportamento dos erros, nestes casos o método mais indicado é o da comparação entre os valores reais e nominais;

- A implementação de forma paramétrica do modelo matemático do comportamento de erros permitiu a realização de forma rápida, de simulações de cada parâmetro que compõe o erro total Δs , além de permitir a simulação de forma automática de diferentes condições de uso da cadeia cinemática, como por exemplo alterações no número de alvéolos, raio da roda entre outros;
- Esta aplicação permitiu observar-se a flexibilidade do método para simulação de ajustagem que foi desenvolvido no NeDIP, e que neste caso foi usado somente para a simulação do comportamento de erros da cadeia cinemática de acionamento e do disco dosador.

CAPÍTULO 6

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO DESENVOLVIMENTO DE CONFIGURAÇÕES MODULARES EM UM TORNO DE ULTRAPRECISÃO

A motivação para este estudo de caso partiu da necessidade de usinagem de componentes de precisão e ultraprecisão, da disponibilidade de uma base de máquina-ferramenta Moore Tools, de um cabeçote Kugler, de uma mesa giratória Zeiss, de um suporte de ferramenta fixo, e um suporte de ferramenta rotativo com mancal aerostático. Além disto objetiva-se ter um equipamento flexível para atender a fabricação de diferentes famílias de peças.

Esta flexibilidade deverá ser alcançada pela montagem dos módulos acima citados sobre a base da máquina formando diferentes configurações. Estes componentes permitem duas configurações, sendo a primeira uma configuração na forma de um torno $R\theta$, e a segunda uma configuração na forma de um torno ZX . A precisão geométrica da montagem entre os módulos é otimizada através de sistemas de ajustagem. Estes sistemas de ajustagem, bem como o plano de ajustagem tem seu desenvolvimento otimizado pelo uso da metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem, e que foi desenvolvida no capítulo 4.

Para que as peças a serem fabricadas tenham a precisão geométrica requerida, e possam ser consideradas componentes de precisão e ultraprecisão, é necessário que os erros dos módulos sejam conhecidos individualmente, e os módulos sejam montados e ajustados de forma que sejam atingidos os objetivos.

A figura 6.1, mostra uma configuração na forma de um torno $R\theta$, apropriada para usinagens de semi-esferas convexas, semi-esferas côncavas, e asferas.

A mesa (2), com movimento na direção do eixo Z , é dotada de acionamento manual, e apenas será usada para posicionamento da mesa (3), sendo que após este posicionamento permanecerá fixa. A mesa (3), com movimento na direção do eixo X , é acionada por um motor, e pode ser comandada por um computador. A mesa giratória Zeiss (4), tem movimento em torno do eixo de giro b , este movimento serve para ajustar o erro de guinamento do cabeçote árvore Kugler (6), e/ou para gira-lo de maneira que se possa usinar peças cônicas. O cabeçote (6), é composto de um mancal linear (6.1), com movimento na direção do eixo auxiliar W , com curso de 90mm, e de um mancal rotativo (6.2), que rotaciona em torno do eixo de giro c . Para auxiliar o alinhamento do eixo de giro c da peça a ser usinada, que é fixada no porta peça (7), e que por sua vez é fixada no mancal rotativo (6.2), com a ponta da ferramenta (8), é usado o espaçador (5), pois o sistema de ajustagem do porta ferramenta fixo (9) não tem curso suficiente. O suporte de ferramenta rotativo com mancal aerostático (10), possui movimento de rotação em torno do eixo de giro auxiliar b' , este movimento é acionado por um motor, e pode ser comandado por um computador. Este movimento de rotação em torno do eixo de giro auxiliar b' , é usado para a produção de superfícies esféricas. Isto se deve ao fato de que se a ferramenta descrever uma trajetória circular, através do uso da mesa rotativa com mancal aerostático, a superfície usinada apresentará uma qualidade de usinagem superior do que se este movimento circular fosse feito por interpolação dos eixos ZX . O porta ferramenta fixo (9), possui um sistema de ajuste grosseiro, e um sistema de ajuste fino que é usado para o alinhamento da ponta da ferramenta em relação ao centro de giro c da peça a ser usinada, com precisão de $\pm 1\mu\text{m}$ na direção do eixo Y .

A figura 6.2, mostra uma configuração na forma de um torno ZX , mais indicado para usinagem de superfícies como discos, cilindros, cones entre outras. A configuração ZX , difere apenas da configuração $R\theta$ pelo fato de não usar o suporte de ferramenta rotativo com mancal aerostático (10). Assim para auxiliar o alinhamento do eixo de giro c da peça a ser usinada, que é fixada no porta peça (7), e que por sua vez é fixada no mancal rotativo (6.2), com a ponta da ferramenta (8), é usado o espaçador (11), que está localizado sob o suporte de ferramenta fixo (9). Para usinagens de peças cônicas gira-se a mesa giratória (4), que irá girar o cabeçote árvore (6), em torno do eixo de giro b , com o ângulo desejado. A trajetória de movimento obtida por este giro apresenta uma qualidade de movimento superior, do que a obtida em relação ao uso de interpolação entre os eixos ZX .

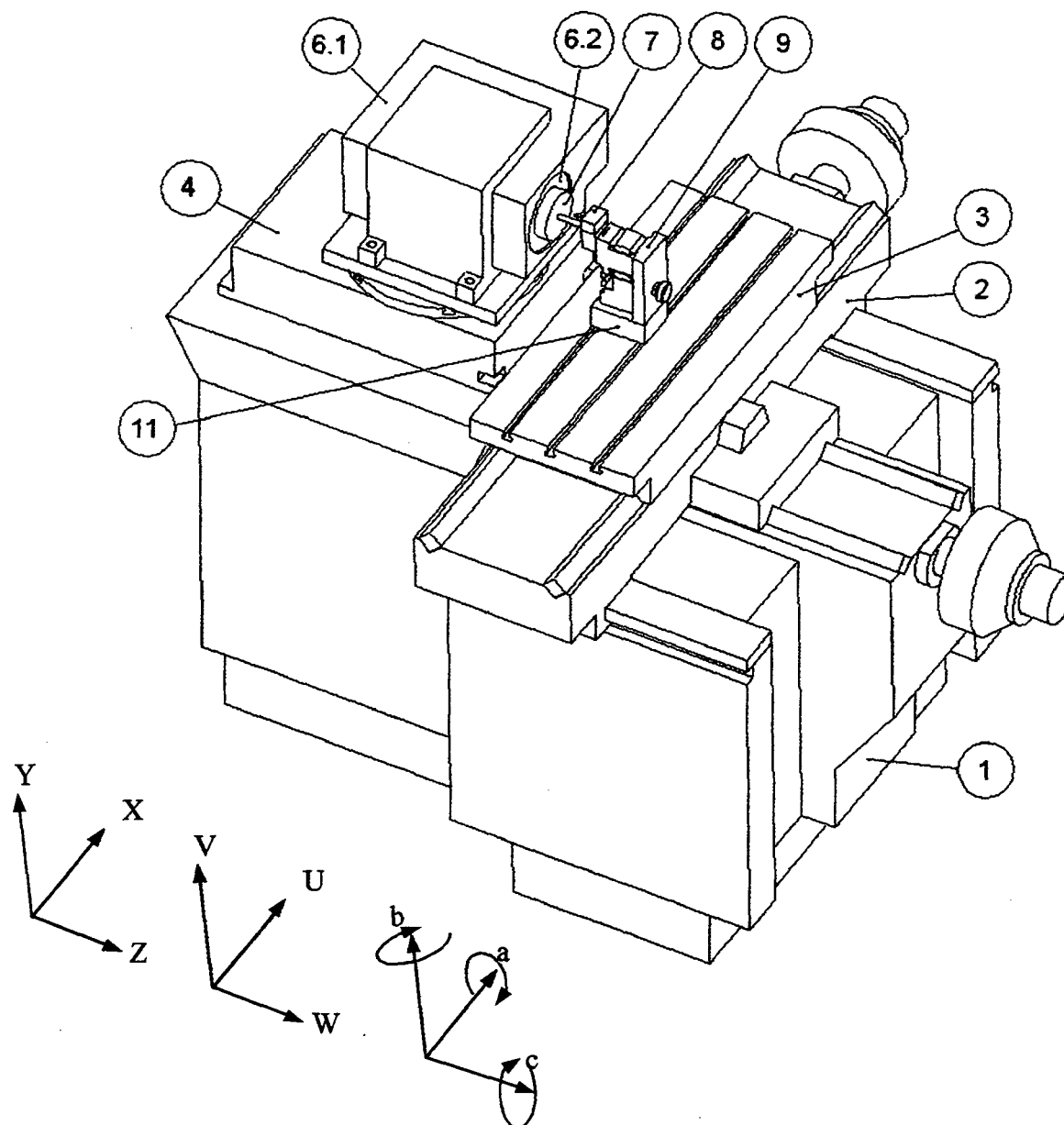


FIGURA 6.2. Configuração na forma de um Torno **ZX**

A seguir será iniciada a aplicação da metodologia de desenvolvimento de produtos de precisão com ênfase no uso de sistemas de ajustagem apresentada no capítulo 4.

6.1. PROJETO INFORMACIONAL

6.1.1. IDENTIFICAR E REGISTRAR AS NECESSIDADES DO CLIENTE E/OU MERCADO

As atividades que vêm sendo desenvolvidas no LMP têm gerado a necessidade de dotar a base com mesa **ZX** Moore Tools (1), com duas configurações. Uma como torno **Rθ** para usinagens de formas esféricas, e outra como torno **ZX** para usinagens de revolução com geratriz reta. Ambas as configurações devem ser aptas para usinagens de alta e ultraprecisão, tanto em qualidade de acabamento, forma geométrica, e exatidão dimensional, as quais são mostradas nas figuras 6.1 e 6.2. A tabela 6.1 apresenta alguns tipos de formas geométricas a serem usinadas no torno e seus requisitos de precisão.

TABELA 6.1. Formas geométricas a serem usinadas e seus requisitos de precisão, Stoeterau (1998).

Forma geométrica a ser usinada	Tolerância dimensional	Tolerância de forma	Rugosidade (Ra)
Discos	$L \text{ e } \varnothing = \pm 1\mu\text{m}$	Planeza = $3\mu\text{m}$ Paralelismo = $2,5\mu\text{m}$	$\leq 10\text{nm}$
Cilindros	$L = \pm 1\mu\text{m}$, $\varnothing = \pm 0,1\mu\text{m}$	Cilindricidade = $1\mu\text{m}$ Linearidade = $1\mu\text{m}$	$\leq 20\text{nm}$
Semi-esfera côncava	Raio = $\pm 1\mu\text{m}$	Esfericidade = $0,5\mu\text{m}$	$\leq 10\text{nm}$
Semi-esfera convexa	Raio = $\pm 1\mu\text{m}$	Esfericidade = $0,1\mu\text{m}$	$\leq 50\text{nm}$
Asferas	$\pm 1\mu\text{m}$	Não aplicável	$\leq 50\text{nm}$
Cones	$L = \pm 1\mu\text{m}$	Conicidade = $0,1\mu\text{m}$	$\leq 20\text{nm}$

Obs.: O diâmetro (\varnothing) e comprimento (L) máximo usinável dependem do tipo de material e forma a ser usinada, que por sua vez influenciará no peso da peça. Isto se deve a limitação de peso que o cabeçote (6) suporta. Como limite de dimensão será usado $\varnothing_{\text{máx.}} = 80\text{mm}$ e $L_{\text{máx.}} = 40\text{mm}$.

6.1.2. ESTABELECEER OS REQUISITOS DE PROJETO DO PRODUTO

Para que o torno possa realizar usinagens de alta e ultraprecisão, é necessário que os movimentos do torno tenham elevada qualidade de trajetória no seu deslocamento, o que é função direta da qualidade das guias empregadas, e da qualidade de montagem, ou seja a posição relativa entre os componentes, e que deve ser garantido através da ajustagem.

Além disso, um ponto de elevada importância na fabricação de espelhos circulares planos, cuja superfície reflexiva envolve o centro de rotação da peça durante a usinagem, é a necessidade de que a ferramenta esteja na mesma altura deste centro de rotação da peça. Segundo Vallejos, (1992), se a ponta da ferramenta (8) estiver posicionada acima do eixo de giro c do mancal rotativo do cabeçote (6.2) será gerado um cone indesejável no centro da peça. Se a ponta da ferramenta (8) estiver posicionada abaixo do eixo de giro c do mancal rotativo do cabeçote (6.2) será gerado um cilindro indesejável no centro da peça, como mostrado na figura 6.3. Para a usinagem de superfícies especulares a tolerância do desalinhamento da ponta da ferramenta (8) em relação ao eixo de giro c da peça que é fixada no porta peça (7), e que está fixado no mancal rotativo do cabeçote (6.2) deve ser $Y = \pm 0,001\text{mm}$. Isto é bastante difícil de ser alcançado, exigindo uma estratégia e dispositivo de ajustagem bastante apurados.

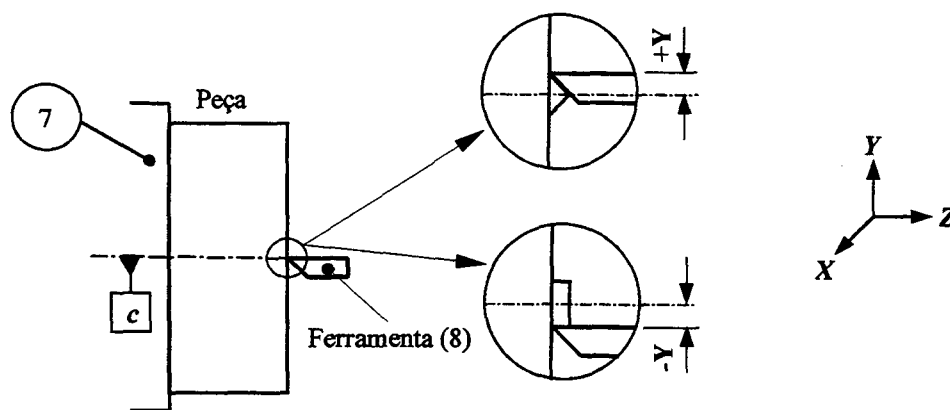


FIGURA 6.3. Requisitos de precisão do torno de ultra precisão para ambas as configurações.

Além dos requisitos de precisão mostrados anteriormente, existem outros requisitos de precisão que são caracterizados com auxílio das figuras 6.1 e 6.2 que são:

- Deslocamento da ferramenta (8) no eixo X deve ser perpendicular ao eixo de giro c do cabeçote (6.2);
- Deslocamento da peça que está fixada no mancal rotativo do cabeçote árvore (6.2) no eixo auxiliar W deve ser paralelo ao eixo Z da mesa (2);
- Posicionamento do eixo c do cabeçote (6) deve ser paralelo ao plano ZX da base (1), independentemente da posição do giro em torno do eixo b , por parte do cabeçote (6);
- Na configuração $R\theta$ o eixo de rotação b' do suporte da ferramenta rotativo com mancal aerostático (10) deve ser perpendicular ao plano ZX da base (1).

- Neste estudo de caso o principal requisito de projeto é a precisão geométrica na montagem dos componentes, porém devem ser levados em conta também os seguintes requisitos:
- Facilidade de montagem e desmontagem dos componentes de forma a reduzir os tempos de *set-up* para novas configurações;
- Facilidade, rapidez e precisão para ajustar diferentes configurações do torno;
- Baixo custo;
- Aproveitamento dos componentes já existentes no LMP, para diferentes configurações;
- Baixa precisão de fabricação dos sistemas de ajustagem;
- Elevada integração de função dos sistemas de ajustagem, isto é, o sistema de ajustagem deve se fixar ao torno, e fixar os componentes como cabeçote e porta ferramenta, além de possuir a função de ajustagem;
- Alta modularidade entre as configurações do torno.

6.1.3. ANALISAR PRODUTOS CONCORRENTES

Não foi encontrado um torno de ultraprecisão com características similares às desejadas pelo cliente LMP. O que há no mercado são tornos de ultraprecisão vendidos com funções específicas, por exemplo, torno para usinagem de formas diversas ZX , ou então um torno do tipo $R\theta$. Um torno com as características desejadas seria um pedido especial, e portanto com um custo mais elevado.

A próxima etapa que é a hierarquização dos requisitos de projeto é dispensável, pois neste caso sabe-se exatamente que o requisito prioritário é a precisão geométrica de montagem entre os componentes. Além disto as configurações já estão definidas bem como os componentes a serem usados.

6.1.4. ESTABELECEER AS ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

Como as configurações já estão definidas bem como os módulos a serem usados, somente será construído um sistema que permita o ajuste do paralelismo entre o eixo c do cabeçote (6) com o plano ZX da base (1), independentemente da posição do giro em torno do eixo b , por parte do cabeçote árvore (6);

O ajuste do paralelismo do eixo auxiliar W do cabeçote (6.2) com o eixo Z da mesa (2); será feito pela mesa divisora que possui uma resolução de movimento angular de $1''$, que é suficiente para atender as necessidades. O alinhamento da ponta da ferramenta (8) com o eixo

auxiliar W do cabeçote (6.2), será feito por um sistema de ajustagem incorporado ao suporte da ferramenta (9), e é mostrado por Rabe (2001). A tabela 6.2 apresenta as especificações de projeto.

TABELA 6.2. Especificações de projeto.

Requisito	Tolerância	Sensor	Indicador
Alinhar ponta da ferramenta (8) com eixo de giro c da peça.	$\pm 1\mu\text{m}$	Sistema de medição como: relógio comparador, laser interferométrico...	Erros geométricos, Erros dimensionais
$(W // Z)$	$\leq 2''$	Sistema de medição da mesa divisora	Erros geométricos, Erros dimensionais
$(c // ZX)$	$\leq 2''$	Sistema de medição como: relógio comparador, laser interferométrico...	Erros geométricos, Erros dimensionais
$(b' \perp ZX)$ configuração $R\theta$	$\leq 2''$	Sistema de medição como: relógio comparador, laser interferométrico...	Erros geométricos, Erros dimensionais

Obs.: Estes requisitos de precisão são aplicáveis a ambas as configurações. A meta de precisão para os ajustes de $(b' \perp ZX)$, é válida somente para a configuração $R\theta$.

6.1.5. IDENTIFICAR AS FONTES DE ERROS E DIREÇÕES SENSÍVEIS

Nesta etapa busca-se conhecer quais as causas dos erros funcionais, de forma que se possa tomar medidas para a correção de tais erros sem, deixar de considerar nenhum aspecto importante. A seguir são apresentadas algumas das principais causas de erros ocasionadas pela montagem e desmontagem dos módulos envolvidos nas configurações:

- O erro de arfagem, isto é, o giro cabeçote (6.2) em torno do eixo de giro a , que causa ausência de paralelismo entre o eixo auxiliar W do cabeçote (6.2), e o eixo Z da mesa (2), que será ajustado por um dispositivo de ajustagem a ser desenvolvido para este fim. A metodologia proposta será usada no desenvolvimento deste dispositivo, e servirá como um exemplo de seu uso;
- Os erro de guinamento, isto é, o giro cabeçote (6.2) em torno do eixo de giro b , que causa ausência de paralelismo entre o eixo auxiliar W do cabeçote (6.2), e o eixo Z da mesa (2) será ajustado pela própria mesa rotativa (4) que possui uma resolução de $1''$ para o movimento angular, neste caso a necessidade é de $\leq 2''$, portanto é suficiente para realizar a ajustagem.
- O erro ΔY de alinhamento entre ponta da ferramenta (8) e o cabeçote (6.2) oriundos das montagens das duas configurações, serão compensados pelo sistema de ajustagem presente no porta ferramenta fixo (9);

- O erro de perpendicularismo entre o eixo auxiliar de giro b' do suporte de ferramenta rotativo com mancal aerostático (10) com relação ao plano XZ será ajustado por um sistema de ajustagem composto de três parafusos diferenciais presentes na base do próprio suporte de ferramenta rotativo com mancal aerostático (10), este erro é pertinente a configuração $R\theta$.

A seguir serão vistos outros erros decorrentes das montagens entre os módulos, e erros que estão presentes nos módulos a serem usados nas configurações.

- Os erros de concentricidade e paralelismo entre a peça, porta peça (7) e cabeçote (6.2), pois fazem parte de outro trabalho;
- Erros presentes na mesa (2) com movimento na direção do eixo Z : retinidade, rolamento, arfagem, guinamento e posicionamento que foi ensaiado e os resultados são mostrados em detalhes no certificado de avaliação geométrica número 1316/01, do anexo 4. A maior incerteza de medição encontrada para o posicionamento da mesa (2) na direção do eixo Z é $\pm 0,0029\text{mm}$.
- Erros presentes na mesa (3) com movimento na direção do eixo X : retinidade, rolamento, arfagem, guinamento e posicionamento que foi ensaiado e os resultados são mostrados em detalhes no certificado de avaliação geométrica número 1316/01, do anexo 4. A maior incerteza de medição encontrada para o posicionamento da mesa (2) na direção do eixo X é $\pm 0,0015\text{mm}$.
- Erros de perpendicularidade entre as mesas (2) e (3) que foi ensaiado e os resultados são mostrados em detalhes no certificado de avaliação geométrica número 1316/01, do anexo 4. O maior erro de perpendicularidade encontrado para um comprimento de 160mm no eixo X e 241,3mm no eixo Z é de $0,0045 \pm 0,0052\text{mm}$.
- Erros presentes no cabeçote (6): batimento radial e axial do mancal rotativo do cabeçote (6.2), erros de retinidade, arfagem, guinamento e posicionamento do mancal linear do cabeçote árvore (6.1), além disto o eixo auxiliar de giro c do cabeçote (6) deve ser paralelo com o plano XZ .
- Erros presentes na mesa rotativa (4): batimento radial, axial e erro de posicionamento angular, além disto o seu eixo de giro b deve ser perpendicular com o plano XZ . A superfície da mesa rotativa (4), também deve ser paralelo com o plano XZ . A mesa rotativa (4) será montada e ajustada somente uma vez, pois será usada para ambas as configurações;

- Erros presentes no suporte de ferramenta rotativo com mancal aerostático (10): batimento radial, axial e erro de posicionamento angular;
- Erros dimensionais e geométricos no espaçador (5) da configuração $R\theta$, e no espaçador (11) da configuração ZX ;
- Erros dimensionais e geométricos na ferramenta (8);
- Erros geométricos e dimensionais oriundos do sistema de ajustagem a ser construído;
- Erros devido a perturbações externas como variação na temperatura ambiente, vibrações, ruídos entre outras;

Em virtude das considerações em relação as causas de erros, a etapa de modelagem e simulação do comportamento de erro do produto não é necessária.

6.2. PROJETO CONCEITUAL

Como todos os componentes estão prontos, resta apenas desenvolver o sistema de ajustagem, assim sendo na fase de projeto conceitual somente será necessário abordar as fases que tratam do projeto do sistema de ajustagem. Como o objetivo deste estudo de caso é aplicar a metodologia apresentada no capítulo 4, a partir desta fase, será considerada apenas a configuração ZX do torno.

6.2.1. PROJETO DE AJUSTAGEM

O circuito de ajustagem serve para visualizar como será feita a ajustagem, a sequência e o inter-relacionamento entre as variáveis de entrada e saída. Neste caso são 3 circuitos de ajustagem, um para cada dispositivo de ajustagem. Os circuitos de ajustagem da configuração ZX mostrados na figura 6.4, são abertos, pois dependem da ação do ajustador, que atua como comparador. Os circuitos de ajustagem 2 e 3 estão em série e são acoplados, o circuito 1 está em paralelo e desacoplado em relação aos circuitos 2 e 3. A sequência de ajustagem para os circuitos acoplados 2 e 3 deve obrigatoriamente ser a seguinte: primeiro ajustar o circuito 2 (ajuste da arfagem do cabeçote (6)), e depois o circuito 3 (ajuste do desalinhamento ΔY entre a ponta da ferramenta (8) e o eixo auxiliar W do cabeçote (6)), isto se deve ao fato de que variando o parâmetro interno Z_2 , este irá influenciar a variável de saída A_3 , mas Z_3 não influencia A_2 . Já o circuito de ajustagem 1 (ajuste do guinamento do cabeçote árvore (6)), pode ser ajustado em qualquer sequência, pois não influencia e nem é influenciado pelos outros circuitos.

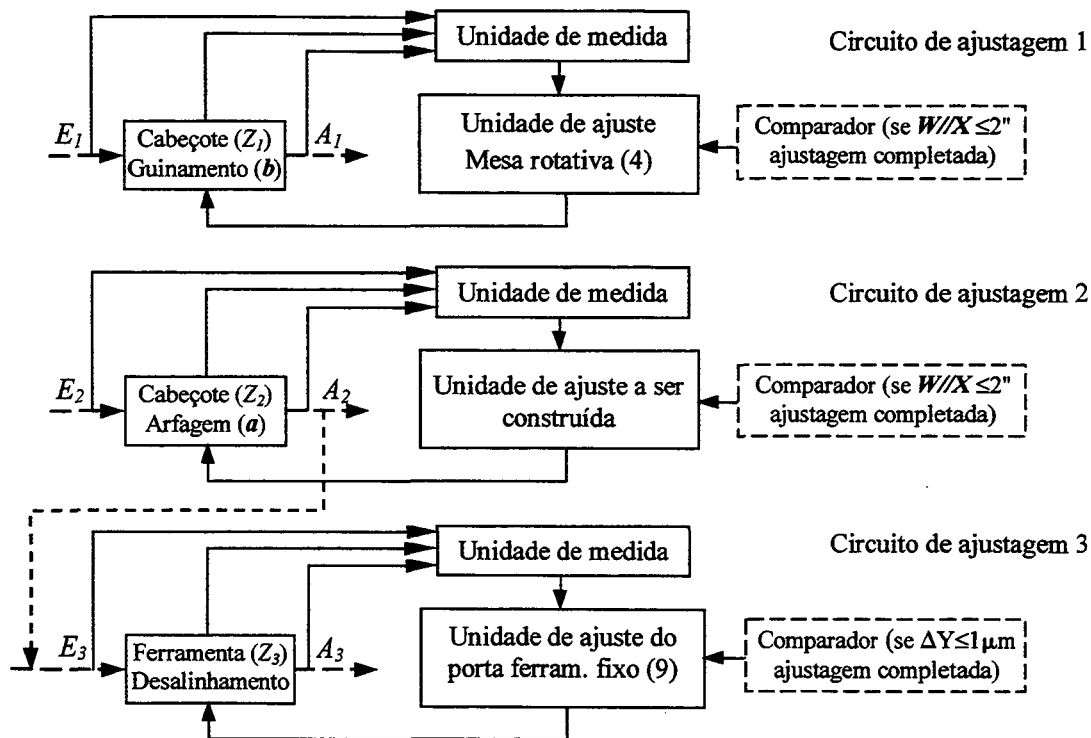


FIGURA 6.4. Circuito de ajustagem para a configuração ZX do torno.

6.2.2. DEFINIR OS MOVIMENTOS, LOCAIS E BASE DE AJUSTAGEM

A arfagem do cabeçote (6) será ajustado pelo movimento angular realizado por uma unidade de ajustagem a ser feita, e localizada sob o cabeçote, cuja variável de ajustagem é o ângulo de arfagem e a variável a ser medida é o paralelismo do eixo auxiliar W com o eixo X . O guinamento será ajustado pelo movimento angular da mesa giratória (4), cuja variável de ajustagem é o ângulo de guinamento e a variável a ser medida é o paralelismo do eixo auxiliar W com o eixo X . O desalinhamento ΔY entre ponta da ferramenta (8) e o eixo auxiliar W do cabeçote (6), será ajustado por movimento de deslocamento na direção Y realizado por uma unidade de ajustagem a ser feita em ouro trabalho, e localizada no suporte da ferramenta fixo (9), sendo que a variável a ser ajustada é ΔY , e a variável a ser medida é o desalinhamento. Como base de ajustagem será utilizada a mesa (2) do torno.

Em função do procedimento de ajustagem se dar pelo ajuste de um valor discreto de um parâmetro funcional (desvio), realizado por cada unidade de ajuste, através de um valor resultante da comparação de um valor medido da variável de saída A_i com um valor meta, assim sendo as tarefas de modelar e simular a ajustagem são dispensáveis.

6.2.3. ESTABELECEER PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO DA UNIDADE DE AJUSTAGEM

Nesta etapa foram propostos princípios de solução para o dispositivo de ajustagem que deve ajustar o erro de rolamento do cabeçote. Como a função aqui é corrigir o erro de rolamento, a ajustagem se dará através da inclinação do cabeçote (6). Para que isto ocorra é necessário um princípio de solução que realize o movimento de correção (inclinação), e outro para o pivotamento deste movimento. Além disto este dispositivo de ajustagem deve servir como interface de fixação entre mesa divisora e cabeçote. Para este dispositivo de ajustagem foram geradas três concepções, que são baseadas nas informações levantadas nas etapas anteriores, e estão organizadas na matriz de concepção mostrada na figura 6.5, de forma a facilitar a visualização e seleção da melhor concepção.

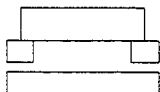
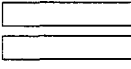
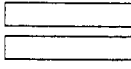
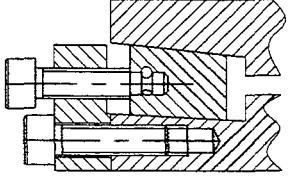
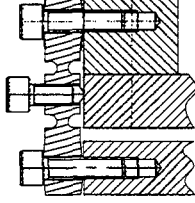
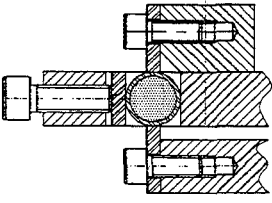
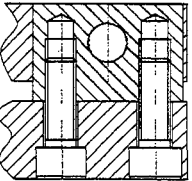
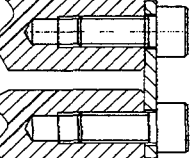
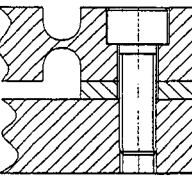
Funções	Concepção 1	Concepção 2	Concepção 3
Fixação ente cabeçote e mesa	 Placa com dois perfis	 Duas placas	 Duas placas
Movimento de inclinação			
Pivotamento			

FIGURA 6.5. Matriz de concepção da unidade de ajustagem

Para a seleção da melhor solução usa-se a matriz de Pugh, mostrada na figura 6.6, que leva em consideração aspectos como: sensibilidade, rigidez, facilidade de operação e custo.

	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Sensibilidade	1	2	2
Rigidez	2	2	2
Facilidade de operação	2	2	2
Custo de fabricação	2	2	1
Total	7	8	7

Valor da relação:
 Atende plenamente = 2
 Atende parcialmente = 1
 Não atende = 0

FIGURA 6.6. Matriz de Pugh para avaliação das concepções.

O resultado da Matriz de Pugh apresenta a solução 2 que será chamada de dispositivo de ajuste da arfagem (12), como a melhor concepção, e é mostrada na figura 6.7. Esta concepção funciona da seguinte forma: Para que haja um ajuste do ângulo α da placa de fixação do cabeçote (12.1), é aplicado um torque no parafuso de ajuste (12.7), que criará uma deformação no sentido horizontal na placa de ajuste (12.5) indicada pela linha traço ponto, esta deformação gera um deslocamento vertical da extremidade esquerda da placa (12.1), que está pivotada em seu lado direito pela placa de articulação (12.2). Isto gera um deslocamento angular α de (12.1).

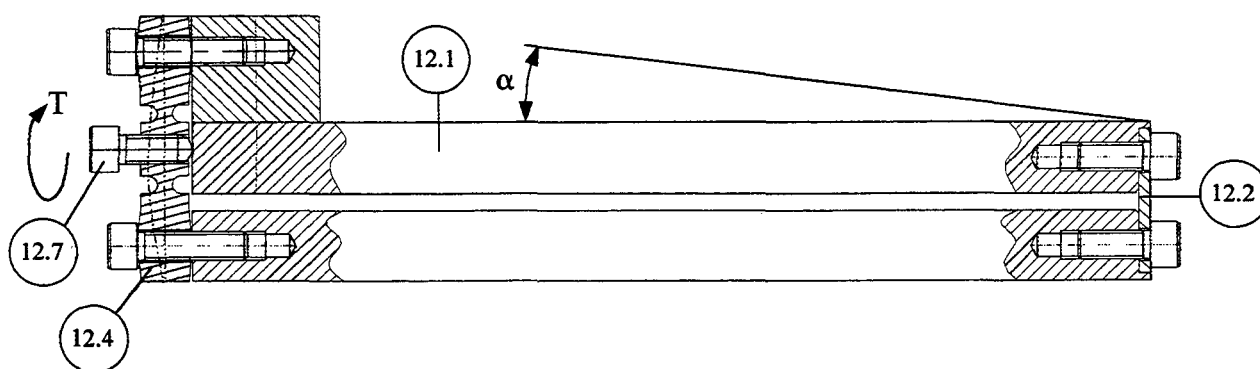


FIGURA 6.7. Solução 2, dispositivo de ajuste da arfagem (12).

6.2.4.DEFINIÇÃO DOS MEIOS AUXILIARES A SEREM EMPREGADOS NA AJUSTAGEM

Esta etapa é importante para averiguar se a solução selecionada é coerente com os meios auxiliares a serem empregados na ajustagem, como sistemas de medição, que devem estar disponíveis, por exemplo, se fosse necessário utilizar-se um sistema de medição difícil de se disponibilizar ou muito sofisticado os custos operacionais aumentariam muito. Neste caso deve-se atentar para a resolução e faixa de medição necessária aos equipamentos de medição, bem como os tipos empregados. Também é importante apontar alternativas para tais equipamentos, pois é possível que nem sempre determinado equipamento esteja disponível.

Para o ajuste do rolamento e do guinamento podem ser utilizados um auto colimador, laser de alinhamento ou um relógio comparador com escala micrométrica, estes instrumentos de medição estão disponíveis no laboratório de metrologia, e o relógio também disponível no LMP.

6.3. PROJETO PRELIMINAR

Nesta fase em função do grande número de etapas não serão utilizados itens específicos para cada uma destas etapas, mas estas serão identificadas por marcadores (■).

- **Definir o arranjo, forma de montagem e desmontagem e/ou sistema de ajustagem:** A figura 6.8 mostra o arranjo do dispositivo de ajuste da arfagem (12), em seu local de funcionamento, e a interface de fixação entre o cabeçote (6), dispositivo de ajuste da arfagem (12) e a mesa rotativa (4). Esta etapa é importante na definição do tamanho, forma, e as interfaces de fixação entre as peças e componentes, e a configuração do sistema. Além disto serve para avaliar a existência de sobreposição de peças, e também pode-se visualizar a forma de montagem e desmontagem. Como trata-se apenas de um dispositivo de ajustagem, e de construção simples não é necessário o desenvolvimento de estruturas de produção e montagens especiais como gabaritos, o que permite que a unidade de ajustagem seja totalmente construída no departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Quanto a reciclagem não há problemas pois os materiais a serem empregados na construção são totalmente recicláveis; e a questão estética não foi considerada. A ergonomia foi considerada, principalmente com relação ao acesso do local escolhido para a ajustagem. Em relação a precisão foi escolhido um arranjo que permita boa sensibilidade e consequentemente ajustes precisos.

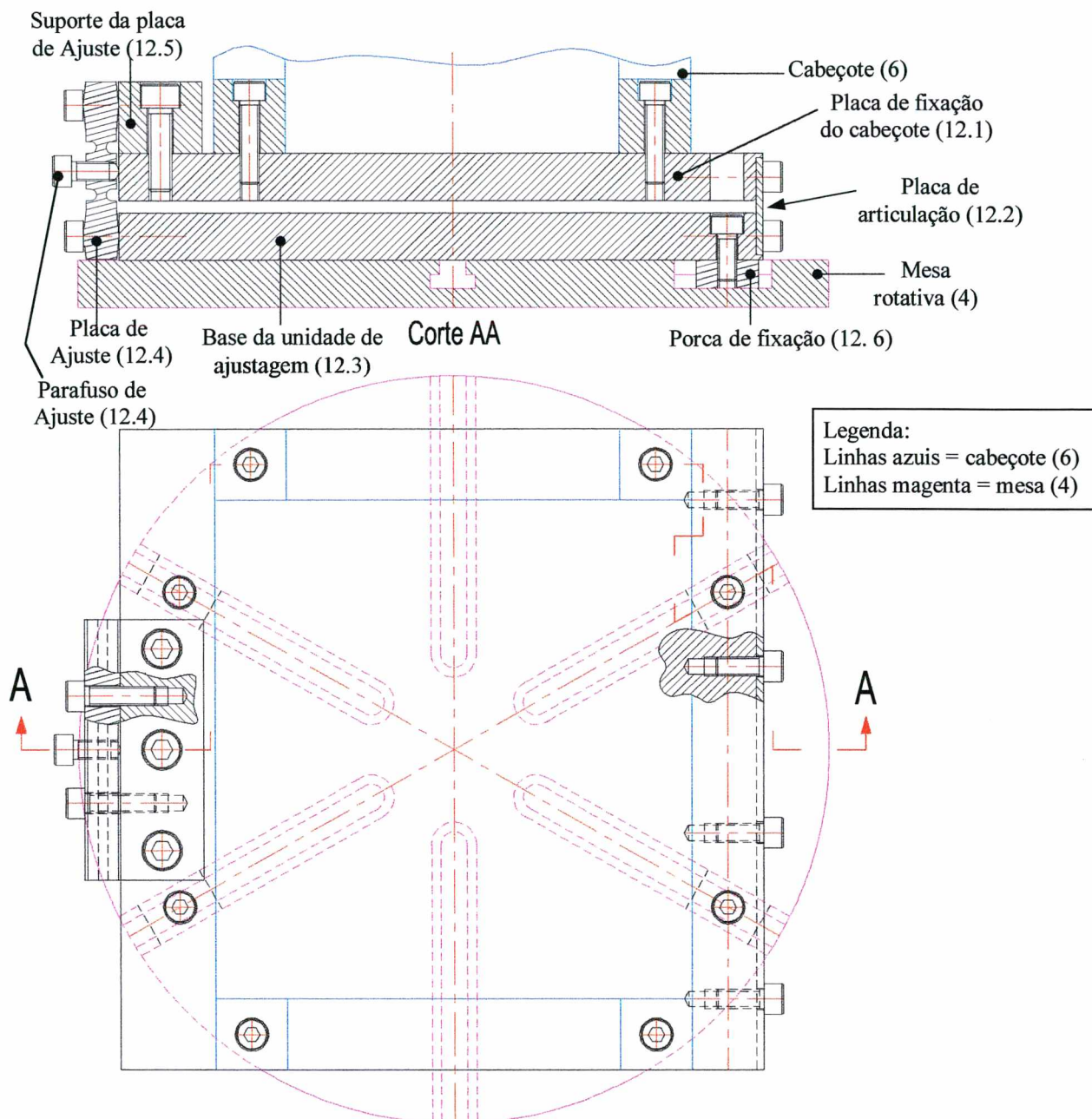


FIGURA 6.8. Arranjo do dispositivo de ajuste da arfagem (12).

- **Selecionar os materiais do produto e/ou SA:** o material selecionado para as peças desta aplicação é o aço ASTM A-36 na forma de chapas laminadas a quente (LQ), e uma tira de chapa laminada a frio (LF) na placa de articulação, item (12.2) da figura 6.8. Este material é de baixo custo, e fácil de adquirir, tem boa usinabilidade e resistência mecânica adequada a aplicação.
- **Dimensionar as peças do produto e/ou sistema de ajustagem:** as peças são calculadas pelo critério do deslocamento, porém os cálculos de dimensionamento não serão detalhados. Os

únicos componentes usados são os parafusos DIN 912 classe 12.9, e são calculadas pelo critério de resistência, mas não terão os cálculos detalhados.

- **Desenvolver fornecedores do produto e/ou SA:** pelo fato dos materiais e componentes serem padronizados não há necessidade do desenvolvimento de fornecedores, porém é importante cadastrar no mínimo 3 fornecedores de cada item para que possa ser realizada uma pesquisa de preços e prazo de entrega.
- **Adequar as normas do produto e/ou SA:** Os materiais e componentes são todos normalizados, e a isto inclui-se o projeto da unidade de ajustagem.
- **Estabelecer os processos de fabricação do produto e/ou SA:** esta unidade de ajustagem é projetada de forma a usar o menor número possível de diferentes processos de usinagem das suas peças, de maneira que podem ser todas usinadas no departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, portanto não é necessário terceirizar a fabricação das peças. Como há poucas peças, e são produzidas pelos mesmos processos de fabricação, além do que o prazo de execução não é crítico, não há necessidade de programar a sequência de fabricação. Como será feito apenas uma unidade de ajustagem não é necessário o desenvolvimento de meios que otimizem a produção como gabaritos. A ajustagem será manual, portanto não é necessário o desenvolvimento de softwares e/ou meios especiais para o auxílio da ajustagem.
- **Estabelecer formas de manutenção, montagem e testes do produto e/ou SA:** a manutenção se restringe a limpezas, a montagem da unidade de ajustagem é simplificada pelos encostos existentes na placa de fixação do cabeçote e na base da unidade de ajustagem. Os testes podem ser feitos para averiguar se a faixa de ajuste e a sensibilidade realmente atendem aos requisitos de projeto.
- **Estabelecer os custos preliminares do produto e/ou SA:** a tabela 6.3 mostra os custos preliminares dos materiais, e a tabela 6.4 mostra os custos de mão de obra utilizados na fabricação da unidade de ajustagem.

TABELA 6.3. Custos preliminares dos materiais e componentes do dispositivo de ajuste da arfagem (12).

Qtd.	Denominação	Dimensão	Material	Peso Un.(Kg)	Preço Un. (R\$)	Total (R\$)
2	Chapa LQ	#25,5 x 275 x 275	ASTM A-36	15,08	1,30	39,21
1	Chapa LQ	#31,75 x 35 x 115	ASTM A-36	1,00	1,30	1,30
1	Chapa LQ	#19,05 x 80 x 115	ASTM A-36	1,38	1,30	1,79
1	Chapa LQ	#15,87 x 25 x 140	ASTM A-36	0,44	1,30	0,57
1	Chapa LF	# 3 x 45 x 275	ASTM A-36	0,29	1,30	0,38
9	Parafuso DIN 912	M8 x 20	Classe 12.9	-	0,20	1,80
8	Parafuso DIN 912	M8 x 35	Classe 12.9	-	0,21	1,68
3	Parafuso DIN 912	M10 x 35	Classe 12.9	-	0,34	1,02
Total						47,75

TABELA 6.4. Custos preliminares da mão de obra de fabricação das peças e da montagem do dispositivo de ajuste da arfagem (12).

Denominação	Qtd horas	Un. R\$/hora	Total R\$/hora
Placa de fixação do cabeçote	3	25,00	75,00
Placa de articulação	1	25,00	25,00
Base da unidade de ajustagem	3	25,00	75,00
Placa de ajuste	5	25,00	125,00
Suporte da placa de ajuste	2	25,00	50,00
Mão de obra de montagem	1	25,00	25,00
Total			375,00

- **Otimizar o projeto do produto e/ou SA:** nesta etapa o projeto encontra-se apto para ser detalhado, sua configuração está totalmente definida, e foram feitas verificações com o intuito de evitar que algum erro possa passar para a fase de projeto detalhado. Estas verificações foram feitas na configuração do produto e sistema de ajustagem através do programa de CAD SolidWorks99 para evitar colisões e/ou interferências entre peças e componentes, erros dimensionais, e verificações na documentação existente.

6.4. PROJETO DETALHADO

- **Detalhar o projeto do produto e/ou SA:** o detalhamento das peças e o desenho de conjunto da unidade de ajustagem não serão detalhados neste estudo de caso.
- **Documentar o projeto do produto e/ou SA:** a principal documentação neste caso refere-se aos procedimentos de ajustagem da configuração ZX, os quais são da seguinte forma: Plano de ajustagem para corrigir o erro de guinamento mostrado na tabela 6.5, baseado na figura 6.9. Plano de ajustagem para corrigir o erro de arfagem mostrado na tabela 6.6 e baseado na figura 6.10. Plano de ajustagem para corrigir o erro de desalinhamento entre a ponta da ferramenta e o centro do cabeçote, mostrado na tabela 6.7 e baseado na figura 6.11. O detalhamento de testes e certificação não serão necessários, bem como o manual do produto.

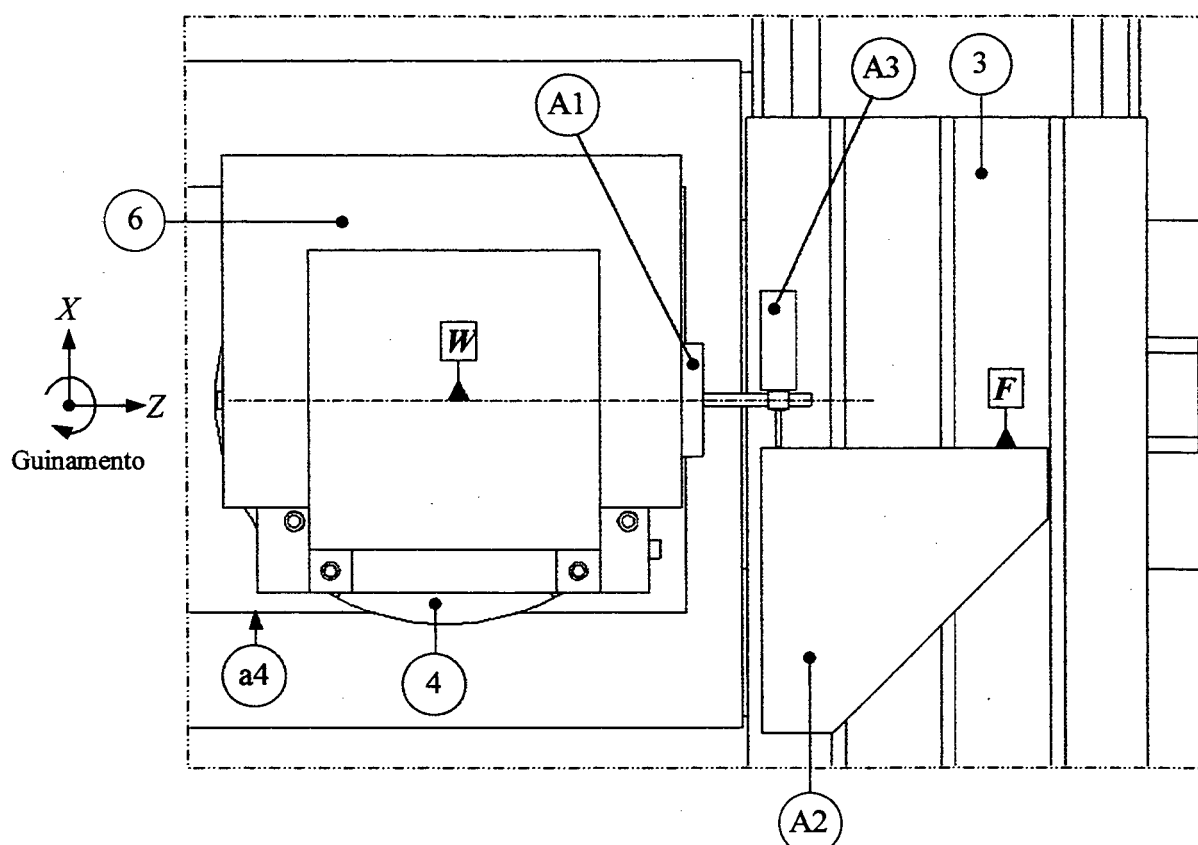


FIGURA 6.9. Detalhe da vista superior do torno para o plano de ajustagem do erro de guinamento do cabeçote (6).

TABELA 6.5. Plano de ajustagem do erro de guinamento do cabeçote (6).

Passo	Un. ou meio de ajustagem	Procedimentos de ajustagem
1	A1	Fixar o suporte do relógio comparador (A1) no cabeçote (6), devendo estar paralelo ao eixo auxiliar W do cabeçote (6)
2	A2	Posicionar esquadro de granito e seus suportes (A2) sobre a mesa (3) do torno. A face F do esquadro (A2) deve ser paralela ao eixo X de da mesa (2) do torno, e deve estar em uma altura em relação ao cabeçote (6) que permita a realização das medições neste arranjo pelo relógio comparador (A3).
3	A3	Fixar relógio comparador (A3) com resolução de $1\mu\text{m}$ no suporte (A1), de maneira que o mesmo fique na posição horizontal, e que seu apalpador toque a superfície F do esquadro de granito (A2).
4	—	Realizar 3 medições para verificar o guinamento do cabeçote (6) em relação a mesa (2), a primeira medição com o movimento na direção Z do cabeçote em seu curso mínimo, a segunda na metade do curso e a terceira com o curso máximo 90mm.
5	4	Comparar os valores medidos com a precisão desejada, neste caso paralelismo ($W // X$) $\leq 1\mu\text{m}$ em 90mm ou $\leq 2''$, se o paralelismo não atingir os valores desejados, realizar o ajuste necessário através da manopla (a4) da mesa rotativa (4), que tem resolução de $1''$.
6	—	Os passos 4 e 5 deve ser repetidos quantas vezes forem necessárias até que se obtenha a precisão desejada.
7	A1, A2, A3	Os meios de ajustagem permanecem para que o erro de arfagem possa ser ajustado.
Resultado:		Paralelismo do eixo auxiliar W e o eixo X .

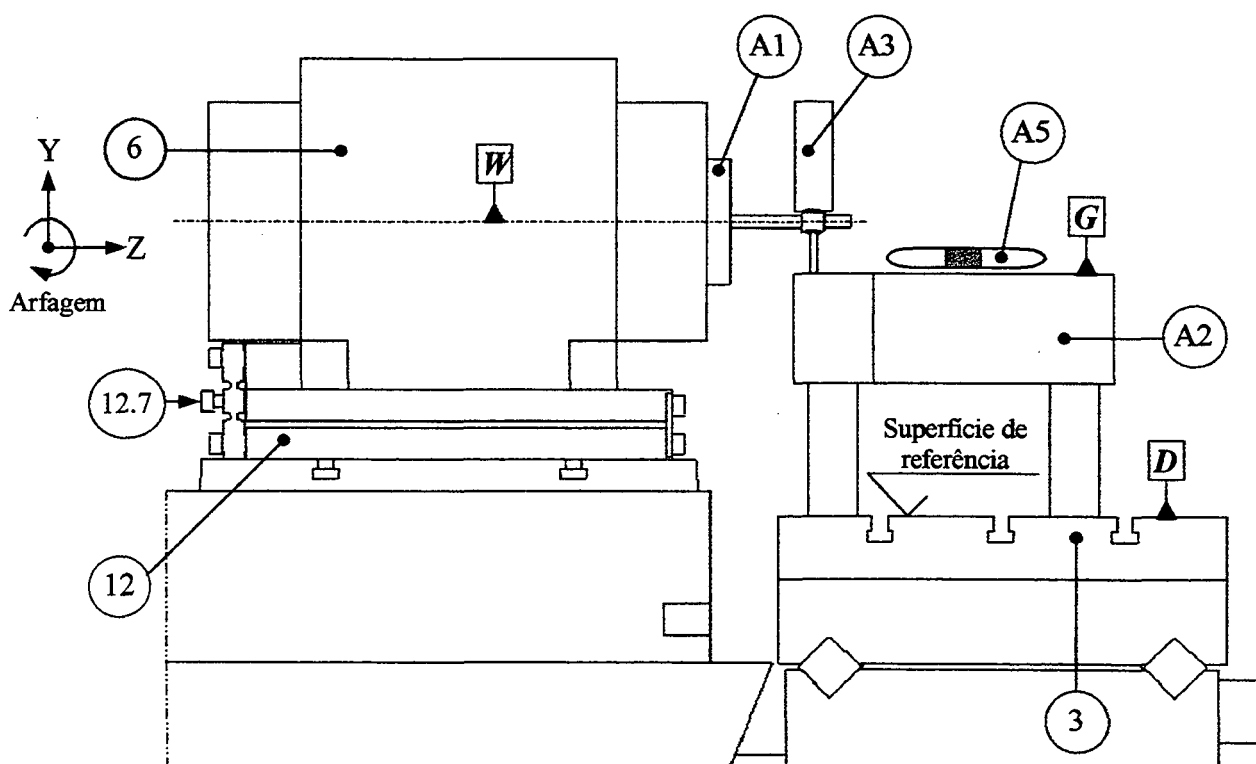


FIGURA 6.10. Detalhe da vista lateral do torno para o plano de ajustagem do erro de arfagem do cabeçote (6).

TABELA 6.6. Plano de ajustagem do erro de arfagem do cabeçote (6).

Passo	Un. ou meio de ajustagem	Procedimentos de ajustagem
1	A2	Reposicionar esquadro de granito e seus suportes (A2) sobre a mesa (3) do torno, com o auxílio do nível eletrônico (A5), posicionar o esquadro de granito de maneira que ($G \parallel D$), e que o apalpador relógio comparador (A3) possa tocar a superfície G.
2	A3	Reposicionar o relógio comparador (A3), de maneira que o mesmo fique na posição vertical, e que seu apalpador toque a superfície G do esquadro de granito (A2).
3	--	Realizar 3 medições para verificar o arfagem do cabeçote árvore (6) em relação a mesa (2), a primeira com o movimento na direção Z do cabeçote em seu curso mínimo, a segunda na metade do curso e a terceira com o curso máximo 90mm.
4	12	Comparar os valores medidos com a precisão desejada, neste caso paralelismo ($W \parallel X$) $\leq 1\mu\text{m}$ em 90mm ou $\leq 0,001''$, se o paralelismo não atingir os valores desejados, realizar o ajuste necessário através do parafuso (12.7) da unidade de ajustagem (12). Ângulo de giro do parafuso 12.7: 45° 90° 135° 180° Ângulo de tombamento: $0''0,43$ $1''0,75$ $3''0,86$ $6''0,95$
6	--	Os passos 3 e 4 deve ser repetido quantas vezes forem necessários até que se obtenha a precisão desejada.
7	A1, A2, A3	Remover os meios de ajustagem.
Resultado		Paralelismo do eixo auxiliar W e o eixo X

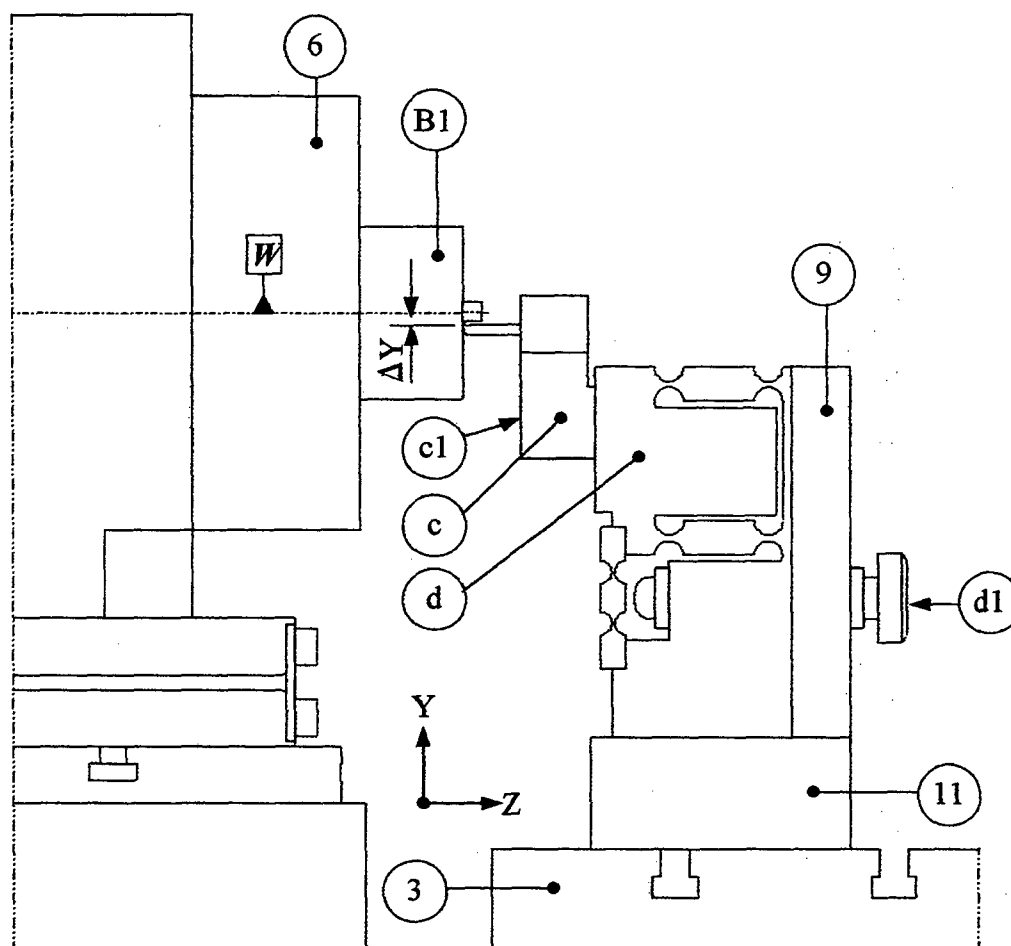


FIGURA 6.11. Detalhe da vista lateral do torno para o plano de ajustagem do desalinhamento da ponta da ferramenta (8) com o eixo W do cabeçote (6).

TABELA 6.7. Plano de ajustagem do desalinhamento da ponta da ferramenta (8) com o cabeçote (6).

Passo	Un. ou meio de ajustagem	Procedimentos de ajustagem
1	c, d	Montar o suporte do porta ferramenta (9) dotado do mecanismo de ajustagem "grosseira" (c) e do mecanismo de ajustagem "fina" (d) sobre o espaçador (11) que é fixado na mesa (3) do torno.
2	B1	Montar a peça de sacrifício (B1) de forma concêntrica, no cabeçote (6)
3	c	Realizar a ajustagem grosseira da altura da ponta da ferramenta em relação ao eixo W do cabeçote (6) no porta ferramenta (9) através do mecanismo de ajustagem "grosseira" (c), e então fixar com o parafuso (c1), para minimizar o desalinhamento.
4	d	Medir o raio do cilindro ou cone da peça de sacrifício (B1), ΔY e comparar os valores medidos com a precisão desejada, neste caso $\Delta Y \leq 1 \mu\text{m}$, se o valor medido estiver acima do desejado, realizar o ajuste necessário através do mecanismo de ajuste fino (d), girando o parafuso (d1). Ângulo de giro do parafuso d1: 45° 90° 135° 180° Desalinhamento ΔY : 0,0001 0,0005 0,0012 0,0022
5	--	O passo 4 deve ser repetido quantas vezes forem necessárias até que se obtenha a precisão meta.
Resultado		A ponta da ferramenta (8) alinhada com o eixo W do cabeçote (6).

- **Detalhar a infra-estrutura para fabricação do produto e/ou SA:** como trata-se de um produto especial a ajustagem será feita manualmente, portanto não é necessário o desenvolvimento e o detalhamento de meios que otimizem a fabricação como dispositivos, e meios automatizados de ajustagem.
- **Calcular os custos do produto e/ou SA:** os custos estimados são mostrados na tabela 6.8.

TABELA 6.8. Detalhamento dos custos de desenvolvimento do dispositivo de ajuste da arfagem (12), e o custo da ajustagem.

Descrição	Qtd. (h)	Custo (R\$/h)	Sub Total
Custo de fabricação	-	-	422,75
Custo de desenvolvimento e detalhamento configuração ZX	30	40,00	1200,00
Custo do ensaio geométrico do torno	8	30,00	240,00
Custo de ajustagem	4	30,00	120,00
Total (R\$)			1982,75

- **Revisar o projeto do produto e/ou SA:** o projeto foi revisado em cada etapa do projeto de forma a evitar que erros possam avançar para as fases seguintes de projeto acarretando maiores prejuízos. Para isto foram usados recursos disponíveis no programa CAD SolidWorks99 como detecção automática de colisões, e a experiência do projetista.

6.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Ô através do emprego da metodologia apresentada no capítulo 4 neste estudo de caso conclui-se que:

- A clareza e abrangência da metodologia fez com que o desenvolvimento do projeto tivesse uma seqüência ordenada das ações necessárias nas fases de desenvolvimento, além de propor várias opções para a melhoria da precisão funcional;
- A organização e sistematização do conhecimento tornou o processo de projeto menos empírico, isto é particularmente útil quando a equipe e/ou membro da equipe de projetos não tenha muita experiência;
- A metodologia proposta permite e estimula o uso e o desenvolvimento de *softwares* no processo de projeto, isto é desejável quando a equipe de projeto desenvolve projetos em um determinado domínio, fazendo com que o tempo de lançamento do produto e seus custos sejam menores;
- A organização dos dados e informações irá facilitar o desenvolvimento de outras configurações como a *Rθ*. O fato do projeto da configuração *ZX* estar sistematizado e documentado.

Além disto a unidade de ajustagem desenvolvida para a configuração **ZX**, permitirá que o torno seja preparado com mais rapidez para a usinagem de formas livres, e quando desejar-se configurações diferentes. A isto soma-se a vantagem de se ter somente um torno, e que em diferentes configurações explora as melhores características de movimentos dos componentes que compõe determinada configuração, como por exemplo a usinagem de cones, onde o cabeçote é inclinado através da mesa divisora, e com isto evita-se que o movimento da ferramenta se dê por interpolação dos movimentos dos eixos **ZX**, e consequentemente melhorando a qualidade superficial das peças usinadas.

O trabalho desenvolvido propiciou uma integração e troca de diferentes conhecimentos e habilidades entre as equipes do NeDIP e o LMP da UFSC e o IMK da TUI, além de contribuir para o avanço no emprego sistematizado de técnicas para obtenção de precisão funcional como a ajustagem, através do uso da metodologia de projeto vista no capítulo 4.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. CONCLUSÕES

O estudo dos erros em produtos, fatores de erros e sua minimização em produtos, são fundamentais no projeto de qualquer produto onde deseja-se precisão funcional. Além disto com o conhecimento dos erros que podem ocorrer no processo de projeto de um produto medidas podem ser tomadas para que erros possam ser evitados;

O levantamento do estado da arte de técnicas utilizadas para obtenção de precisão funcional, é um conjunto de informações importantes para a metodologia que se utiliza de tais técnicas, e para os projetistas, de maneira que possam ter várias opções de melhorar a precisão funcional dos produtos, pois sem o conhecimento de tais técnicas há poucas chances do produto atender as especificações de projeto como precisão funcional;

O conhecimento encontrado a respeito de ajustagem que estava fragmentado em vários trabalhos de diversos autores foi agregado, e esta disposto em uma forma mais adequada ao uso, além de ser incorporado à metodologia, a importância disto pode ser vista no capítulo 5 e 6, pois tornou o processo de projeto do dispositivo de ajustagem metódico, organizado e rápido. Os conceitos foram reunidos de forma que se possa ter uma linguagem padronizada quando trabalha-se com ajustagem, o que facilita o trabalho em equipe. Tais conhecimentos e conceitos servirão de base para o desenvolvimento de novos trabalhos na área de ajustagem como aqueles descritos no item que trata de recomendações para trabalhos futuros.

Para a simulação do processo de ajustagem e obtenção dos valores de correção quando os circuitos de ajustagem são acoplados é indispensável o uso de ferramentas computacionais, caso contrário incorre-se no processo de tentativa e erro. Para suprir esta necessidade foi desenvolvido no NeDIP um método que faz uso de planilha eletrônica para realizar a simulação. Este método foi aplicado no estudo de caso do capítulo 5, e mostrou-se flexível e fácil de usar.

A aplicação da metodologia proposta nos estudos de caso dos capítulos 5 e 6, mostrou-se abrangente e flexível, pelo fato de serem de domínios diferentes, pois a metodologia foi desenvolvida de forma a ser genérica para o projeto de produtos com exigência de precisão funcional, não importando o tipo de produto a ser desenvolvido, nem a magnitude de precisão envolvida. Além disto facilitou a visualização do fluxo de informações, orientando ao longo do processo de projeto, em relação as etapas a serem seguidas, pois estas estão dispostas de forma adequada ao uso, fornecendo opções de ações a serem tomadas para a melhoria da precisão. Cabe mencionar que a metodologia proposta não alterou o processo de projeto tradicional, porém agregou informações, ferramentas e principalmente técnicas, como a ajustagem que são voltadas ao projeto de produtos de precisão.

7.2. DIFICULDADES ENCONTRADAS

A maior dificuldade encontrada foi a pouca bibliografia disponível sobre ajustagem, pois poucos pesquisadores trabalham com ajustagem. Somente é conhecida uma universidade no mundo, a TUI - Universidade Técnica de Ilmenau na Alemanha, que trabalha com ajustagem, além do que, a bibliografia existente está em alemão, que é um idioma que a maioria da equipe não conhece.

Outra dificuldade foi em relação ao programa ILJUR, que foi desenvolvido na TUI, e foi repassado a equipe do NeDIP e LMP para que o mesmo fosse usado nas simulações de ajustagem, e tivesse sua interface desenvolvida em português. Para isto foi necessário fazer simulações para tentar entender como o programa e o seu algoritmo funciona, perdendo-se muito tempo até descobrir-se que o programa tem erros de interface e de funcionamento, além disto chegou-se a conclusão que o programa é inadequado para as aplicações que se pretendia simular. Além do que a documentação do programa não esta adequada, dificultando seu entendimento.

7.3. CONTRIBUIÇÕES

Podem ser apontadas as seguintes contribuições deste trabalho:

- A sistematização dos conhecimentos sobre erros em produtos, suas fontes, erros que podem ocorrer durante o processo de projeto, e os meios para obtenção da precisão funcional, principalmente ajustagem, são fundamentais para o projeto de produtos de precisão e constituem-se em um *know how* importante para o departamento de engenharia mecânica;

- O uso desta metodologia auxiliará o NeDIP a ampliar uma de suas linhas de pesquisa, que é a de desenvolvimento de implementos agrícolas, assim um novo campo onde a metodologia poderá ser usada é o desenvolvimento de implementos agrícolas para a agricultura de precisão, além disto a metodologia poderá ser empregada pela equipe do NeDIP no desenvolvimento de outros produtos que necessitem precisão funcional;
- A metodologia e a técnica de simular a ajustagem através de planilhas de cálculo será útil ao LMP para o desenvolvimento de novos projetos de produtos e de pesquisas envolvendo precisão funcional, e na avaliação do comportamento de erros de produtos e mecanismos;
- Desenvolvimento de um método de simulação da ajustagem baseado em planilhas eletrônicas de cálculo, que é paramétrico, de fácil uso e implementação, possível de ser configurado pelo usuário de acordo com suas necessidades;
- Este trabalho propiciou a troca de conhecimentos e habilidades entre os envolvidos neste projeto, que são o NeDIP e o LMP, da UFSC e o IMK - Institut für Maschinenelement und Konstruktion da Universidade Técnica de Ilmenau, no âmbito do programa de cooperação denominado PROBRAL.
- A pesquisa propiciou a publicação de dois artigos nacionais, outro internacional, além de outros dois artigos que foram enviados e aceitos para publicação em congressos brasileiros. Pela abrangência do trabalho, ainda poderão ser realizados outros artigos aumentando a divulgação e aprimorando a pesquisa.

7.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento deste trabalho permitiu que se visualizasse novas possibilidades de desenvolver na linha de pesquisa abordada por este trabalho como:

- Desenvolvimento de um programa para a simulação da ajustagem e do comportamento de erros que possa ser realizado através de uma interface gráfica simultaneamente ao processo de desenvolvimento dos princípios de solução em sistemas CAD, poderia ser um *plug in* (aplicativo) do próprio sistema CAD;
- A metodologia proposta pode ser implementada em uma metodologia genérica de desenvolvimento de produtos já implementada computacionalmente como um *plug in* (aplicativo), ou como uma *toolbar* (grupo de comandos específicos), para o desenvolvimento de produtos de precisão;

- Desenvolvimento de um programa computacional que permita gerar rapidamente as equações que regem o comportamento de erros de um produto ou princípio de solução, de maneira que possam ser simulados vários princípios de solução, e se possa selecionar o de melhor desempenho do ponto de vista da precisão funcional;
- Modelar e simular o comportamento de erros de todos os mecanismos que tem influência na precisão funcional da semeadora simultaneamente;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT 04:015:06-004, **Projeto de norma, Semeadora de precisão: ensaio de laboratório**. São Paulo, 1994. 22 p.
- ABNT 04:015:06-010, **Projeto de norma, Semeadoras e distribuidoras de fertilizantes ou corretivos - terminologia: definições**. São Paulo, 1996. 23 p.
- BACK, N. **Metodologia de projeto**. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1983.
- BACK, N., FORCELLINI, F. A., **Apostila da disciplina de Projeto de Produtos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 1997, Universidade Federal de Santa Catarina.
- BAUERSCHMIDT, M. **Beitrag zur Verbesserung des Fehlerverhaltens von Geräten**. Ph.D. Thesis, TUI Technische Universität Ilmenau, 1975.
- CHEN, J. S. **Computer aided accuracy enhancement for multi-axis CNC machine tools**. International Journal Machine Tools Manufacturing, vol. 35, número 4, p 593 - 605, 1995.
- EMAN, K. F., WU, B. T., **A generalized geometric error model for multi-axis machines**. Annals of the CIRP, vol. 36/1, p 253-256, 1987.
- FANKHAUSER, Indústria de Máquinas Agrícolas. **Catálogo de produtos**. Tuparendi - RS, 2000.
- FONSECA, A. J. H., **Desenvolvimento de uma sistemática para obtenção das especificações de projetos de produtos industriais**. Florianópolis, 1996. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- GOUVÊA, J. L. C., **Beratungssystem für die Justierung**. Proceedings 44th IWK, TU Ilmenau Germany, p 340-345, 1999.
- GRASENACK, U. **Beratungssystem Justierung**. Proceedings 37th IWK, TU Ilmenau Germany, p 197-205, 1991.
- HANSEN, F. **Adjustment of Precision Mechanisms**. London Iliffe Books LTD, 1970.

- HÖHNE, G. **Apostila da disciplina: Mecânica de Precisão Ajustagem de Instrumentos de Precisão**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: UFSC, 1990.
- ILJUR, **Programm zur Simulation von Tolerierungs und Justieraufgaben sowie der Diagnose vorgenommener Justierungen konkreten Geräten**. TUI Technische Universität Ilmenau, 1995.
- ISO 230-1, **Test code for machine tools, Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions**, 1996-07-01.
- KAISER, G. **Getting better accuracy with non-precision ball screws**. American Machinist, p 50-51, February, 1993.
- KIRIDENA, V. S. B., FERREIRA P. M., **Kinematic modeling of quasistatic errors of three-axis machining centers**. International Journal Machine Tools Manufacturing. Vol. 34, n° 1, p 85-100, 1994.
- KOLLER, R. **Konstruktionslehre für den Maschinenbau**, Springer-Lehrbuch, 1994.
- KRAUSE, W., **Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und elektronik**. Carl Hanser Verlag München Wien, 2000.
- LATYEV, S., NÖNNIG, R., **Theoretische Untersuchungen zu Fehlern und zur Justierung am Beispiel eines fotoelektrischen Autokollimationsfernrohres**. Proceedings 44th IWK, TU Ilmenau Germany, p 326-331, 1999.
- LO, C. H. et al., **An application of real-time error compensation on a turning center**. International Journal Machine Tools Manufacturing, vol. 35, número 12, p 1669-1682, 1995.
- MARIBONDO, J. F.; BACK, N.; FORCELLINI, F. A. **Metodologia de projeto de sistemas modulares SISMOD**. Publicação interna do Núcleo Integrado de Desenvolvimento de Produtos NeDIP, UFSC, Florianópolis, 2000.
- McKEOWN, P. A. **MSc in Advanced Automation & Design**. Precision Engineering & Nanotechnology Lecture Notes, 1997.
- McMAHOM, C. A., et al. **A Classification of Errors in Design**. Proceedings of the ICED, p 110-124, 1997.

- NÖNNIG, R., et al., **Der Justierleitstand - ein Werkzeug zur Lösung von Justieraufgaben.** Proceedings 44th IWK, TU Ilmenau Germany, p 51-56, 1999.
- NÖNNIG, R., **Lehrblätter Justierung**, TU Ilmenau Germany, 1995.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno.** Prentice Hall do Brasil, 1993.
- OGLIARI, A. **Estudo e desenvolvimento de mecanismos dosadores de precisão de máquinas semeadoras.** Florianópolis, 1990. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- PAHL, G., BEITZ, W. **Engineering Design: a Systematic Approach.** Springer Verlag, Berlim, 1996.
- POSTLETHWAITE, S. R., FORD, D. G., **Geométric error analysis software for CNC machine tools.** Proceedings for LANDMAP 99, Laser Metrology and Machine Performance, p 305-316, july 1999.
- RABE, R. G., **Desenvolvimento de um Sistema de Fixação e Ajustagem de Ferramenta para Usinagem de Ultraprecisão.** Florianópolis, 2001. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- REIS, A. V., **Máquinas e mecanismos dosadores para semeadura de precisão.** Florianópolis, 2000. Monografia apresentada na disciplina Tópicos Especiais em Sistemas Mecânicos, Universidade Federal de Santa Catarina.
- ROMI. **Sistema de alta precisão para usinagem de furos.** Santa Barbara do Oeste - SP, 1987. Catálogo de exposição.
- SARTORI S., ZHANG G. X. **Geometric error measurement and compensation of machimes.** Annals of the CIRP v. 44/2, p 599-609, 1995.
- SATTLER A.; Passo Fundo EMBRAPA/CPT, 2000. Comunicação pessoal.
- SCHELLER, T., EBERHARDT, R., **Positionier und Justierverfahren für die automatisierte Montage mikrooptischer Systeme.** Proceedings 44th IWK, TU Ilmenau Germany, p 33-44, 1999.
- SCHILLING, M. et al., **Justierung in der Feinwerktechnik.** Proceedings 38th IWK, TU Ilmenau Germany, p 33-44, 1993.

- SCHILLING, M., **Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik**, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr. sc.tech., Ilmenau - Germany, 1982.
- SCHORCHT, H., et al. **Automatisches Justieren mittels Präzisionsbiegen Aufgaben, Probleme und Lösungen aus konstruktiver Sicht**. Proceedings 37th IWK, TU Ilmenau Germany, p 151-163, 1991.
- SLOCUM, A. H. **Precision Machine Design**. Prentice Hall, New Jersey, 1992.
- SMITH, S. T., CHETWIND, D. G., **Foundations of Ultraprecision Mechanism Design**. Gordon and Breach Science Publisher, 1994.
- SÖDERBERG, Rikard, JOHANNESSON, H., **Tolerance Chain Detection by Geometrical Based Coupling Analysis**. Journal of Engineering Design, 1999.
- SOHLENTIUS, G., **A produção consciente impõe requisitos novos ao projeto de máquinas-ferramentas**. Máquinas e Metais, p 44-68, maio 1996.
- SOUZA, A. R. **Melhoria das peças usinadas através da qualificação geométrica da máquina ferramenta**. V CEM – NNE , 1998.
- SPRINGSGUTH, S., **Rechnergesteuertes Justierkleben ein Beitrag zur Automatisierung des Montageprozesses in der Optikfertigung**. Proceedings 44th IWK, TU Ilmenau Germany, p 187-195, 1999.
- SPUR, G. **Otimização térmica através de projeto e técnicas compensatórias**. Máquinas e Metais, p 46-65, 1994.
- SRIVASTAVA, A. K., et al., **Modeling geometric and thermal errors in a five-axis CNC machine tool**. International Journal Machine Tools Manufacturing, vol. 35, número 9, p 1321-1337, 1995.
- STEWART, M. G., **Simulation of Human Error in Reinforced Concrete Design**. Research in Engineering Design, Vol. 4, Número 1, p 51-60, 1992.
- STOETERAU, R. L., **Desenvolvimento do protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente para usinagem de ultraprecisão com ferramenta de geometria definida**. Florianópolis, 1998. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

- VALLEJOS, R. V., **Processos e modos de fabricação de superfícies esféricas de precisão.** Florianópolis, 1990. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- WEILL, R., et al., **Tolerancing for Function.** Annals of the CIRP v. 37/2, p 603-609, 1988.
- WU S. M., NI J. **Precision machining without precise machinery.** Annals of the CIRP v. 38/1, p 533-536, 1989.
- ZOCKER, K. P., KOSUB, S., GÖRSCH, **Toleranzgruppenoptimierung für die Adaptative und Selektive Montage.** Proceedings 44th IWK, TU Ilmenau Germany, p 463-468, 1999.

BIBLIOGRAFIA

- ASAO, T., et al., **Precision turning by Means of a Simplified Predictive Function of Machining Error**. Annals of the CIRP v. 41/1, p 447-451, 1992.
- BERT, E. P. **O Impacto da usinagem de precisão a alta velocidade na produção**. Máquinas e Metais, p 36-41, 1997.
- CHEN, J. S. **Active bearing preload control of a high speed spindle using piezoelectric actuators**. Proceedings of ASPE, p 351-354, 1998.
- CLEGHORN, W. L., et al, **Optimum tolerancing of planar mechanisms based on na error sensitivity analysis**. Transactins of the ASME, vol. 115, 07/1993.
- CUI, X., et al. **New Hybrid Air-spindle with Permanent Magnetic bearing Incorporated for High Motion Accuray and High Stiffness**. Proceedings of ASPE, p 325-328, 1998.
- DAVIDSON, A. **Handbook of Precision Engineering**. McGraw Hill Book Company, New York, 1972.
- GRIFFITH W. H., **Check-list para usinagem de alta velocidade e alta precisão**. Máquinas e Metais, p 82-88, março 1994.
- HAFERKORN, W. **Parâmetros para o projeto de um centro de usinagem avançado**. Máquinas e Metais, p 44-68, fevereiro 1993.
- HÖHNE, G. **Apostila da disciplina: Mecânica de Precisão Projeto de Instrumentos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: UFSC, 1990
- HÖHNE, G. **Apostila da disciplina: Mecânica de Precisão Projeto de Componentes de Mecânica de Precisão**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica UFSC. Florianópolis, 1990
- HÖHNE, G. et al. **Quality improvement of precision engineering products by means of a CAA system**. Proceedings of the ICED, p 309-312, 1997.
- HÖHNE, G., et al. **Justieruntersuchungen am Justierleitstand**. Proceedings 44th IWK, TU Ilmenau Germany, p 333-339, 1999.

HÖHNE, G., et al. **Justieruntersuchungen zum Ausrichten von optischen un mechanischen Achsen.** Proceedings 44th IWK, TU Ilmenau Germany, p 346-352, 1999.

HORIKAWA, O. **An active air journal bearing.** Journal of JASPE, vol. 55, p 2063 – 2068, 1989.

IKAWA N., et al. **Ultraprecision metal cuting – The past, the present and the future.** Annals of the CIRP, vol. 40/2, p 587-594, 1991.

INOKUMA, T., **Tecnologia de máquinas da próxima geração: a visão dos fabricantes japoneses.** Máquinas e Metais, p 124-144, abril 1996.

KRAUSE, W. **Konstruktions elemente der fine mechanik.** Carl Hanser Verlag, München-Wien, 1993.

McKEON, P. **The role of precision enginnering in manufacturing of the future.** Annals of the CIRP v. 36/2, p 495-501, 1987.

McKEOWN, P. **Latest developments in improving machine tool accuracy performance.** Lamdamap Conference, 1999.

McKEOWN, P. **Some sub system design for the Japanese AMMTRA CNC Ultra precision grinding machine - TOYODA Corporation.** Precision engineering & nanotechnology Lecture Notes, 1997.

MOLLENHAUER, O., **Neue Aspekte der Justierung von geraden Biegefedern.** Proceedings 37th IWK, TU Ilmenau Germany, p 165-174, 1991.

NAKAZAWA, H. **Principles of Precision Engineering.** Oxford University Press, New York, 1994.

NÖNNIG, R., et al., **Genauigkeit und Justierung in Konstruktionsprozeß von Präzisionsgeräten.** Proceedings 37th IWK, TU Ilmenau Germany, p 139-149, 1989.

NÖNNIG, R., **Justierung in der Konstruktion.** Proceedings 44th IWK, TU Ilmenau Germany, p 53-61, 1999.

OSHIRO, O. T., et al., **Controlador de máquinas-ferramenta de ultraprecisão.** Máquinas e Metais, p 96-104, novembro 1998.

- PEREIRA, M. **Desenvolvimento de uma mesa de retificação para a usinagem de sapatas planas circulares para mancais aerostáticos.** Florianópolis, 1998. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- PRITSCHOW, G., JUNGHANS, G., **Controle de sistema aberto, um desafio ao futuro da indústria de máquinas.** Máquinas e Metais, p 20 – 38, setembro 1996.
- SATO, K. et al. **Control and elimination of lead screw backlash for ultra precision positioning.** JSME International Journal, Series C, v. 38/1, p 36-41, 1995.
- SHELLEKENS, P., ROSIELLE N., **Design for precision.** Annals of the CIRP, vol. 17/2, p 587-586, 1998.
- SHEPPARD, M. H., COOTE, R. C., **O mercado vai influir sobre os projetos de máquinas desta década.** Máquinas e Metais, p 22 – 32, fevereiro 1994.
- TOKUMO, S. **Características de projeto e fabricação de centros de usinagem.** Máquinas e Metais, p 32 – 42, 1990.
- UENO, S. **A máquina ferramenta tem múltiplas funções e é rápida e precisa.** Máquinas e Metais, p 42 – 53, 1996.
- VALENTI, M. **Machine tools get smarter.** Artigo capturado em agosto de 1999. <http://gilligan.prod.oclc.org:3051/FLECH>.
- WECK, M. et al. **Reduction and compensation of thermal errors in machine tools.** Annals of the CIRP v. 44/2, p 589-598, 1995.
- WEINGAERTNER, W. L. **Desenvolvimentos na usinagem de Ultra-precisão.** Monografia, Centro Tecnológico UFSC, Florianópolis, 1990.
- WHITE, A. J., et al., **An identification and study of mechanisms causing thermal errors in CNC machine tools.** Proceedings for LANDMAP 99, Laser Metrology and Machine Performance, p 101 – 112, July 1999.

ANEXO 1

Tabela mostrando a implementação do método de simulação de ajustagem usando planilha eletrônica.

l_2	l_3	l_1	φ	ψ	$\varepsilon(\Delta_2)$	$\varepsilon(\Delta_3)$	$\varepsilon(\Delta_1)$	$Tol.\Delta_2$	$Tol.\Delta_3$	$Tol.\Delta_1$	ΔS_T	$Tol.\Delta_2$	$Tol.\Delta_3$	$Tol.\Delta_1$	ΔS_T
mm	mm	mm	graus	graus	-	-	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
100	80	30	-10	9,087	1,013	1,013	-0,160	0,097	0,043	-0,047	0,149	0,065	0,029	-0,032	0,100
100	80	30	-9	10,34	1,016	1,017	-0,182	0,097	0,043	-0,047	0,151	0,065	0,029	-0,032	0,101
100	80	30	-8	11,60	1,019	1,021	-0,205	0,097	0,043	-0,047	0,152	0,065	0,029	-0,032	0,102
100	80	30	-7	12,87	1,020	1,026	-0,228	0,097	0,043	-0,047	0,154	0,065	0,029	-0,032	0,103
100	80	30	-6	14,14	1,021	1,031	-0,252	0,097	0,043	-0,047	0,155	0,065	0,029	-0,032	0,104
100	80	30	-5	15,43	1,020	1,037	-0,276	0,097	0,043	-0,047	0,156	0,065	0,029	-0,032	0,105
100	80	30	-4	16,73	1,019	1,044	-0,301	0,097	0,043	-0,047	0,158	0,065	0,029	-0,032	0,106
100	80	30	-3	18,03	1,016	1,052	-0,326	0,097	0,043	-0,047	0,159	0,065	0,029	-0,032	0,107
100	80	30	-2	19,35	1,012	1,060	-0,351	0,097	0,043	-0,047	0,160	0,065	0,029	-0,032	0,108
100	80	30	-1	20,68	1,006	1,069	-0,378	0,097	0,043	-0,047	0,161	0,065	0,029	-0,032	0,108
100	80	30	0	22,02	1,000	1,079	-0,405	0,097	0,043	-0,047	0,162	0,065	0,029	-0,032	0,109
100	80	30	1	23,38	0,992	1,089	-0,432	0,097	0,043	-0,047	0,163	0,065	0,029	-0,032	0,110
100	80	30	2	24,75	0,983	1,101	-0,461	0,097	0,043	-0,047	0,164	0,065	0,029	-0,032	0,110
100	80	30	3	26,13	0,973	1,114	-0,491	0,097	0,043	-0,047	0,165	0,065	0,029	-0,032	0,111
100	80	30	4	27,53	0,961	1,128	-0,521	0,097	0,043	-0,047	0,166	0,065	0,029	-0,032	0,112
100	80	30	5	28,94	0,948	1,143	-0,553	0,097	0,043	-0,047	0,167	0,065	0,029	-0,032	0,112
100	80	30	6	30,38	0,933	1,159	-0,586	0,097	0,043	-0,047	0,168	0,065	0,029	-0,032	0,113
100	80	30	7	31,83	0,917	1,177	-0,621	0,097	0,043	-0,047	0,168	0,065	0,029	-0,032	0,113
100	80	30	8	33,30	0,899	1,196	-0,657	0,097	0,043	-0,047	0,169	0,065	0,029	-0,032	0,114
100	80	30	9	34,79	0,879	1,218	-0,695	0,097	0,043	-0,047	0,17	0,065	0,029	-0,032	0,114
100	80	30	10	36,30	0,857	1,241	-0,735	0,097	0,043	-0,047	0,171	0,065	0,029	-0,032	0,115
100	80	30	11	37,84	0,833	1,266	-0,777	0,097	0,043	-0,047	0,171	0,065	0,029	-0,032	0,115
100	80	30	12	39,41	0,807	1,294	-0,822	0,097	0,043	-0,047	0,172	0,065	0,029	-0,032	0,116
100	80	30	13	41,01	0,779	1,325	-0,870	0,097	0,043	-0,047	0,173	0,065	0,029	-0,032	0,116
100	80	30	14	42,64	0,748	1,359	-0,921	0,097	0,043	-0,047	0,174	0,065	0,029	-0,032	0,117
100	80	30	15	44,31	0,713	1,397	-0,976	0,097	0,043	-0,047	0,175	0,065	0,029	-0,032	0,117
100	80	30	16	46,02	0,676	1,440	-1,036	0,097	0,043	-0,047	0,176	0,065	0,029	-0,032	0,118
100	80	30	17	47,77	0,634	1,488	-1,102	0,097	0,043	-0,047	0,177	0,065	0,029	-0,032	0,119
100	80	30	18	49,58	0,588	1,542	-1,174	0,097	0,043	-0,047	0,178	0,065	0,029	-0,032	0,120
100	80	30	19	51,44	0,537	1,604	-1,254	0,097	0,043	-0,047	0,18	0,065	0,029	-0,032	0,121
100	80	30	20	53,37	0,480	1,676	-1,345	0,097	0,043	-0,047	0,181	0,065	0,029	-0,032	0,122
100	80	30	21	55,38	0,414	1,760	-1,449	0,097	0,043	-0,047	0,183	0,065	0,029	-0,032	0,123
100	80	30	22	57,49	0,339	1,860	-1,569	0,097	0,043	-0,047	0,186	0,065	0,029	-0,032	0,125
100	80	30	23	59,70	0,252	1,982	-1,711	0,097	0,043	-0,047	0,189	0,065	0,029	-0,032	0,127
100	80	30	24	62,06	0,147	2,134	-1,885	0,097	0,043	-0,047	0,194	0,065	0,029	-0,032	0,130
100	80	30	25	64,59	0,017	2,331	-2,105	0,097	0,043	-0,047	0,200	0,065	0,029	-0,032	0,134

ANEXO 2

Tabela de simulação do comportamento do erro com o uso das variáveis de influência.

No	v	r	na	$\Delta\alpha$	ε_α	Δs_α	R_T	$R_{T_{real}}$	ΔR_T	ε_{R_T}	Δs_{R_T}	ef	Δef	ε_{ef}	Δs_{ef}	$\pm \Delta s_{adm}$	Δs
-	km/h	m	-	graus	-	mm	-	-	-	-	mm	-	-	-	mm	mm	mm
1	5	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	3,2%	-149,7	4,79	74,5	5,91
2	6	0,35	22	0,06	521,7	0,55	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	5,5%	-149,7	8,24	74,5	9,72
3	7	0,35	22	0,10	521,7	0,91	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	8,8%	-149,7	13,18	74,5	15,03
4	8	0,35	22	0,14	521,7	1,28	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	3,2%	-149,7	4,79	74,5	7,01
5	5	0,35	22	0,18	521,7	1,64	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	5,5%	-149,7	8,24	74,5	10,82
6	6	0,35	22	0,22	521,7	2,01	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	8,8%	-149,7	13,18	74,5	16,12
7	7	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,524	-0,150	-221,0	33,15	0,5%	3,2%	-149,7	4,79	74,5	38,12
8	8	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,574	-0,100	-221,0	22,10	0,5%	3,2%	-149,7	4,79	74,5	27,07
9	5	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,624	-0,050	-221,0	11,05	0,5%	8,8%	-149,7	13,18	74,5	24,41
10	6	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,674	0,000	-221,0	0,00	0,5%	3,2%	-149,7	4,79	74,5	4,97
11	7	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,724	0,050	-221,0	-11,05	0,5%	5,5%	-149,7	8,24	74,5	-2,63
12	8	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,774	0,100	-221,0	-22,10	0,5%	8,8%	-149,7	13,18	74,5	-8,74
13	5	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,824	0,150	-221,0	-33,15	0,5%	3,2%	-149,7	4,79	74,5	-28,17
14	6	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	3,2%	-149,7	4,79	74,5	5,91
15	7	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	3,8%	-149,7	5,69	74,5	6,81
16	8	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	4,4%	-149,7	6,59	74,5	7,71
17	5	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	5,0%	-149,7	7,49	74,5	8,61
18	6	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	5,6%	-149,7	8,39	74,5	9,51
19	7	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	6,2%	-149,7	9,28	74,5	10,40
20	8	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	6,8%	-149,7	10,18	74,5	11,30
21	5	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	7,4%	-149,7	11,08	74,5	12,20
22	6	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	8,0%	-149,7	11,98	74,5	13,10
23	7	0,35	22	0,02	521,7	0,18	0,674	0,670	-0,004	-221,0	0,94	0,5%	8,6%	-149,7	12,88	74,5	14,00

ANEXO 3

Tabela de simulação do comportamento do erro com o uso com da comparação entre os valores nominais e os valores reais

No	v	r	na	$\Delta\alpha$	Δs_α	R_T	$R_{T\text{ real}}$	ΔR_T	$\Delta s R_T$	e_f	Δe_f	Δs_{e_f}	$\pm \Delta s$ adm.	Δs
-	km/h	m	-	graus	mm	-	-	-	mm	-	-	mm	mm	mm
1	5	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	3,2%	4,95	74,5	6,12
2	6	0,35	22	0,06	0,55	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	3,2%	4,95	74,5	6,49
3	7	0,35	22	0,10	0,91	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	3,2%	4,95	74,5	6,87
4	8	0,35	22	0,14	1,27	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	3,2%	4,95	74,5	7,25
5	5	0,35	22	0,18	1,64	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	3,2%	4,95	74,5	7,63
6	6	0,35	22	0,22	2,00	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	3,2%	4,95	74,5	8,01
7	7	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,524	-0,150	42,63	0,5%	3,2%	4,95	74,5	49,24
8	8	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,574	-0,100	25,95	0,5%	3,2%	4,95	74,5	31,98
9	5	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,624	-0,050	11,93	0,5%	3,2%	4,95	74,5	17,49
10	6	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,674	0,000	0,00	0,5%	3,2%	4,95	74,5	5,14
11	7	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,724	0,050	-10,29	0,5%	3,2%	4,95	74,5	-5,50
12	8	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,774	0,100	-19,24	0,5%	3,2%	4,95	74,5	-14,77
13	5	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,824	0,150	-27,12	0,5%	3,2%	4,95	74,5	-22,91
14	6	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	3,2%	4,95	74,5	6,12
15	7	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	3,8%	5,92	74,5	7,09
16	8	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	4,4%	6,89	74,5	8,07
17	5	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	5,0%	7,88	74,5	9,07
18	6	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	5,6%	8,89	74,5	10,08
19	7	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	6,2%	9,90	74,5	11,10
20	8	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	6,8%	10,93	74,5	12,14
21	5	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	7,4%	11,97	74,5	13,19
22	6	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	8,0%	13,03	74,5	14,25
23	7	0,35	22	0,02	0,18	0,674	0,670	-0,004	0,94	0,5%	8,6%	14,10	74,5	15,33

ANEXO 4



CMCQ

Laboratório de
METROLOGIA DIMENSIONAL
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

credenciado pelo **INMETRO** sob o n. 034



Certificado de Avaliação Geométrica

Data da Emissão: 08/05/01

Data da Calibração: 04/05/01

n. 1316/01

Página: 1 de 5

1. CONTRATANTE: DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - UFSC
Campus da UFSC - S/Nº - FLORIANÓPOLIS - SC

2. SOLICITANTE: O mesmo

3. LOCAL DA CALIBRAÇÃO: Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC

4. Torno (SMC):

Nº Série (fabricante):	9-233
Nº Identificação (solicitante):	Não consta
Eixos Coordenados:	Eixo X: (0 a 160) mm
	Eixo Z: (0 a 9,5) "
Incremento Digital:	Eixo X: 0,001 mm
	Eixo Z: 0,001"

5. SÍNTESE DESTA CALIBRAÇÃO:

5.1. Conforme procedimentos internos, a maior incerteza de medição encontrada para o posicionamento, considerando que seja efetuada a respectiva correção, é de:

$\pm 0,0015$ mm, para o eixo X;

$\pm 0,0029$ mm ($\pm 0,00006$ "), para o eixo Z;

5.2. O maior erro de perpendicularidade encontrado para um comprimento de 160,0 mm x 241,3 mm é de:

(0,0045 \pm 0,0052) mm

6. PADRÃO UTILIZADO (SMP):

6.1. LASER INTERFEROMÉTRICO RENISHAW

Nº Registro (CERTI): RC 1903

U_{95} : $\pm 0,3$ μ m

Rastreabilidade: Certificado de Calibração CERTI 3937/00, de 01/12/00, válido até 12/01.

6.2. TRANSDUTOR ELETRÔNICO DE DESLOCAMENTO

Nº Registro (CERTI): RL 1103

U_{95} : $\pm 0,4$ μ m

Rastreabilidade: Certificado de Calibração CERTI 1315/01, de 03/05/01, válido até 05/03.

6.3. ESQUADRO DE GRANITO

Nº Registro (CERTI): RC 1128

U_{95} : ± 3 μ m (perpendicularidade)

Rastreabilidade: Certificado de Calibração CERTI 0491/98, de 06/05/98, válido até 05/02.



CMCQ

Laboratório de
METROLOGIA DIMENSIONAL
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

credenciado pelo **INMETRO** sob o n. 034



Certificado de Avaliação Geométrica

Data da Emissão: 08/05/01
Data da Calibração: 04/05/01

n. 1316/01

Página: 2 de 5

7. PROCEDIMENTO INTERNO DE AVALIAÇÃO:

7.1. ENSAIO DE POSICIONAMENTO: BASEADO NO PC-180, REV 002

O laser interferométrico foi montado com seu feixe alinhado paralelamente ao deslocamento do eixo a ensaiar, os pontos pré-determinados foram referenciados no torno, realizando-se as leituras no dispositivo mostrador do laser. Foram realizados 4 ciclos de medição.

7.2. ENSAIO DE PERPENDICULARIDADE: PC-119, REV 000

O esquadro de granito foi apoiado sobre a mesa do torno, sendo o seu lado maior (500 mm) alinhado paralelamente ao deslocamento do eixo Z do mesmo. Foi fixado ao cabeçote do torno um comparador eletrônico de deslocamento, com o qual mediu-se o erro de perpendicularidade entre os eixos de medição da mesma. O ensaio foi realizado em um comprimento de 160 mm do eixo X da máquina. Foram realizados três ciclos de medição.

OBSERVAÇÕES

Condições Ambientais Durante a Calibração:

- Temperatura: 20,0 +/- 0,5 °C
- Umidade Relativa do Ar: 50 +/- 10%

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (v_{eff}) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e v_{eff} são apresentados na tabela de resultados.

8. RESULTADOS:

8.1. Ensaio de Posicionamento do Eixo X:

INDIC. NO SMC [mm]	MEDIA DAS INDIC. NO SMP [mm]	CORREÇÃO [mm]	U_{95} ± [mm]	k	v_{eff}	HISTERESE [mm]
10,0000	10,0000	0,0000	0,0013	2,00	Infinito	*****
20,0000	19,9995	-0,0005	0,0013	2,00	Infinito	*****
30,0000	29,9993	-0,0007	0,0013	2,00	Infinito	*****
40,0000	39,9990	-0,0010	0,0013	2,00	Infinito	*****
50,0000	49,9988	-0,0012	0,0013	2,01	Infinito	*****
60,0000	59,9982	-0,0018	0,0014	2,01	Infinito	*****



CMCQ

Laboratório de
METROLOGIA DIMENSIONAL
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

credenciado pelo **INMETRO** sob o n. 034

Certificado de Avaliação Geométrica

Data da Emissão: 08/05/01
Data da Calibração: 04/05/01

n. 1316/01

Página: 3 de 5

INDIC. NO SMC [mm]	MÉDIA DAS INDIC. NO SMP [mm]	CORREÇÃO [mm]	U_{95} ± [mm]	k	V_{eff}	HISTERESE [mm]
70,0000	69,9982	-0,0018	0,0013	2,01	Infinito	*****
80,0000	79,9980	-0,0020	0,0014	2,02	Infinito	*****
90,0000	89,9975	-0,0025	0,0014	2,02	Infinito	*****
100,0000	99,9976	-0,0024	0,0014	2,02	Infinito	*****
120,0000	119,9967	-0,0033	0,0013	2,01	Infinito	*****
140,0000	139,9956	-0,0044	0,0014	2,01	Infinito	*****
160,0000	159,9946	-0,0054	0,0015	2,05	51	*****
160,0000	160,0895	0,0895	0,0013	2,00	Infinito	0,0949
140,0000	140,0903	0,0903	0,0013	2,00	Infinito	0,0947
120,0000	120,0911	0,0911	0,0013	2,00	Infinito	0,0944
100,0000	100,0918	0,0918	0,0013	2,00	Infinito	0,0942
90,0000	90,0919	0,0919	0,0013	2,00	Infinito	0,0944
80,0000	80,0921	0,0921	0,0013	2,00	Infinito	0,0941
70,0000	70,0921	0,0921	0,0013	2,00	Infinito	0,0939
60,0000	60,0922	0,0922	0,0013	2,01	Infinito	0,0940
50,0000	50,0925	0,0925	0,0014	2,01	Infinito	0,0937
40,0000	40,0927	0,0927	0,0014	2,01	Infinito	0,0937
30,0000	30,0931	0,0931	0,0014	2,01	Infinito	0,0938
20,0000	20,0933	0,0933	0,0014	2,01	Infinito	0,0938
10,0000	10,0937	0,0937	0,0014	2,02	Infinito	0,0937

Obs: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação.

8.2. Ensaio de Posicionamento do Eixo Z (em milímetro):

INDIC. NO SMC [mm]	MÉDIA DAS INDIC. NO SMP [mm]	CORREÇÃO [mm]	U_{95} ± [mm]	k	V_{eff}	HISTERESE [mm]
50,8000	50,7998	-0,0002	0,0027	3,31	3	*****
76,2000	76,1998	-0,0002	0,0029	3,31	3	*****
101,6000	101,6000	0,0000	0,0027	3,31	3	*****
127,0000	127,0001	0,0001	0,0022	2,87	4	*****
152,4000	152,4001	0,0001	0,0021	2,87	4	*****
177,8000	177,8005	0,0005	0,0016	2,52	6	*****
203,2000	203,2008	0,0008	0,0020	2,65	5	*****
209,5500	209,5508	0,0008	0,0011	2,05	48	*****



Laboratório de
METROLOGIA DIMENSIONAL
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CMCQ

credenciado pelo INMETRO sob o n. 034



Certificado de Avaliação Geométrica

Data da Emissão: 08/05/01
Data da Calibração: 04/05/01

n. 1316/01

Página: 4 de 5

INDIC. NO SMC [mm]	MÉDIA DAS INDIC. NO SMP [mm]	CORREÇÃO [mm]	U_{95} ± [mm]	k	V_{eff}	HISTERESE [mm]
215,9000	215,9010	0,0010	0,0015	2,28	10	*****
222,2500	222,2507	0,0007	0,0014	2,18	15	*****
228,6000	228,6008	0,0008	0,0011	2,01	Infinito	*****
234,9500	234,9507	0,0007	0,0010	2,00	Infinito	*****
241,3000	241,3010	0,0010	0,0011	2,00	Infinito	*****
241,3000	241,3375	0,0375	0,0011	2,02	Infinito	0,0365
234,9500	234,9864	0,0364	0,0010	2,00	Infinito	0,0357
228,6000	228,6362	0,0362	0,0010	2,00	Infinito	0,0354
222,2500	222,2856	0,0356	0,0010	2,00	Infinito	0,0349
215,9000	215,9357	0,0357	0,0009	2,00	Infinito	0,0347
209,5500	209,5853	0,0353	0,0010	2,00	Infinito	0,0345
203,2000	203,2354	0,0354	0,0010	2,02	Infinito	0,0346
177,8000	177,8352	0,0352	0,0010	2,04	58	0,0347
152,4000	152,4346	0,0346	0,0015	2,43	7	0,0345
127,0000	127,0346	0,0346	0,0017	2,65	5	0,0345
101,6000	101,6345	0,0345	0,0019	2,87	4	0,0345
76,2000	76,2346	0,0346	0,0024	3,31	3	0,0348
50,8000	50,8348	0,0348	0,0026	3,31	3	0,0350

Obs: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação.

8.3. Ensaio de Posicionamento do Eixo Z(em polegada):

INDIC. NO SMC ["]	MÉDIA DAS INDIC. NO SMP ["]	CORREÇÃO ["]	U_{95} ± ["]	k	V_{eff}	HISTERESE ["]
2,00000	1,99999	-0,00001	0,00011	3,31	3	*****
3,00000	2,99999	-0,00001	0,00011	3,31	3	*****
4,00000	4,00000	0,00000	0,00011	3,31	3	*****
5,00000	5,00000	0,00000	0,00009	2,87	4	*****
6,00000	6,00000	0,00000	0,00008	2,87	4	*****
7,00000	7,00002	0,00002	0,00006	2,52	6	*****
8,00000	8,00003	0,00003	0,00008	2,65	5	*****
8,25000	8,25003	0,00003	0,00004	2,05	48	*****
8,50000	8,50004	0,00004	0,00006	2,28	10	*****
8,75000	8,75003	0,00003	0,00006	2,18	15	*****
9,00000	9,00003	0,00003	0,00004	2,01	Infinito	*****



CMCQ

Laboratório de
METROLOGIA DIMENSIONAL
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

credenciado pelo **INMETRO** sob o n. 034

Certificado de Avaliação Geométrica

Data da Emissão: 08/05/01

Data da Calibração: 04/05/01

n. 1316/01

Página: 5 de 5

INDIC. NO SMC	MÉDIA DAS INDIC. NO	CORREÇÃO	U_{95}	k	v_{eff}	HISTERESE
["]	SMP ["]	["]	$\pm ["]$			["]
9,25000	9,25003	0,00003	0,00004	2,00	Infinito	*****
9,50000	9,50004	0,00004	0,00004	2,00	Infinito	*****
9,50000	9,50148	0,00148	0,00004	2,02	Infinito	0,00144
9,25000	9,25143	0,00143	0,00004	2,00	Infinito	0,00141
9,00000	9,00143	0,00143	0,00004	2,00	Infinito	0,00139
8,75000	8,75140	0,00140	0,00004	2,00	Infinito	0,00137
8,50000	8,50141	0,00141	0,00004	2,00	Infinito	0,00137
8,25000	8,25139	0,00139	0,00004	2,00	Infinito	0,00136
8,00000	8,00139	0,00139	0,00004	2,02	Infinito	0,00136
7,00000	7,00139	0,00139	0,00004	2,04	58	0,00137
6,00000	6,00136	0,00136	0,00006	2,43	7	0,00136
5,00000	5,00136	0,00136	0,00007	2,65	5	0,00136
4,00000	4,00136	0,00136	0,00007	2,87	4	0,00136
3,00000	3,00136	0,00136	0,00009	3,31	3	0,00137
2,00000	2,00137	0,00137	0,00010	3,31	3	0,00138

Obs: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação.

4. ENSAIO DE PERPENDICULARIDADE

Erro de Perpendicularidade	k	v_{eff}
0,0045 +/- 0,0052 mm	2,05	51


Gilmar Gualberto Soares
Gerente Técnico


Adenir Campos Nunes
Técnico Metrologista